

# VII CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE SIMULAÇÃO DE EDIFÍCIOS



**IBPSA LATAM**  
9-10 MAR | 2023  
**FLORIANÓPOLIS**

**Ana Paula Melo**  
**Larissa Pereira de Souza**  
**Matheus Soares Geraldi**  
**Roberto Lamberts**  
**organizadores**

**Anais do**  
**VII Congresso Latino-Americano de**  
**Simulação de Edifícios**  
**- IBPSA LATAM 2023 -**



Organizadores  
Ana Paula Melo  
Larissa Pereira de Souza  
Matheus Soares Geraldi  
Roberto Lamberts



IMAGINAR O BRASIL EDITORA

© **IBPSA Brasil, 2023**  
Capa © LabEEE/UFSC, 2023  
Projeto Editorial © Imaginar o Brasil Editora, 2023

ISBN: 978-65-992964-4-4

**Imaginar o Brasil Editora**

Florianópolis – SC – Brasil  
www.imaginarbrasileditora.com  
imaginarobrasil@gmail.com

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)**

Congresso Latino-Americano de Simulação de Edifícios (7. : 2023 : Florianópolis, SC)  
Anais do VII Congresso Latino-Americano de Simulação de Edifícios [livro eletrônico] : IBPSA Latam 2023 / organização Ana Paula Melo, Matheus Soares Geraldi. -- Florianópolis, SC : Imaginar o Brasil Editora, 2023.

PDF

Vários autores.  
Bibliografia.  
ISBN 978-65-992964-4-4

1. Edifícios - Projeto e construção 2. Engenharia civil 3. Engenharia - Congressos 4. Simulação - Edifícios I. Melo, Ana Paula. II. Geraldi, Matheus Soares. III. Título.

23-147333

CDD-620

**Índices para catálogo sistemático:**

1. Engenharia : Congressos 620

Tábata Alves da Silva - Bibliotecária - CRB-8/9253-0

**Diretoria da IBPSA Brasil 2022-2024**

Presidência	<b>Ana Paula Melo</b>
Vice-presidência	<b>Roberto Lamberts</b>
Secretaria	<b>Anderson Letti</b>
Tesouraria	<b>Martin Gabriel Ordenes Mizgier</b>
Conselho Fiscal	<b>Alberto Hernandez Neto</b> <b>David Douek</b> <b>Eduardo Grala da Cunha</b> <b>Joyce Carlo</b>

**Organização - VII Congresso Latino-Americano de Simulação de Edifícios**

Comissão organizadora	<b>Ana Paula Melo</b> <b>Larissa Pereira de Souza</b> <b>Matheus Soares Geraldi</b> <b>Nathalia Coelho</b> <b>Roberto Lamberts</b>
Comissão científica	<b>Alberto Hernandez Neto</b> <b>Ana Paula Melo</b> <b>Anderson Letti</b> <b>Bianca Milani</b> <b>Caio de Carvalho Lucarelli</b> <b>Eduardo Grala da Cunha</b> <b>Emeli Guarda</b> <b>Joyce Carlo</b> <b>Larissa Pereira de Souza</b> <b>Leticia Gabriela Eli</b> <b>Ligiana Priscila Guimarães Fonseca</b> <b>Marcelo Salles Olinger</b> <b>Maria Andrea Triana</b> <b>Mariana Navarro Benevides</b> <b>Mário Alves da Silva</b> <b>Martin Gabriel Ordenes Mizgier</b> <b>Mariane Pinto Brandalise</b> <b>Mateus Bavaresco</b> <b>Matheus Bracht</b> <b>Matheus Soares Geraldi</b> <b>Roberto Lamberts</b>

## SUMÁRIO

**INFRAESTRUCTURA VERDE PARA LA REDUCCIÓN DE LOS CONSUMOS ENERGÉTICOS DE REFRIGERACIÓN DE EDIFICIOS EN CLIMAS MEDITERRÁNEOS / 8**  
Massimo Palme e Claudio Carrasco

**IMPACTO DO USO DE DIFERENTES ARQUIVOS CLIMÁTICOS NA CLASSIFICAÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA ENVOLTÓRIA DE UMA EDIFICAÇÃO SEGUNDO A INI-R: O CASO DE VIÇOSA-MG / 12**  
Maria Alves da Silva e Joyce Correna Carlo

**IMPACTO DO ENVELHECIMENTO NATURAL DE TELHA CERÂMICA FRIA SOBRE O CONSUMO ENERGÉTICO DE UMA EDIFICAÇÃO / 18**  
Ana Carolina Hidalgo-Araujo, Lorena Santos Couto Bezerra e Kelen Almeida Dornelles

**DESEMPENHO TÉRMICO DE ARGAMASSAS PRODUZIDAS COM RESÍDUOS DA MINERAÇÃO E SIDERURGIA / 24**  
Letícia Matias Martins, Vítor Freitas Mendes, Adriano Pinto Gomes e Júlia Castro Mendes

**INFLUÊNCIA DAS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO NA INÉRCIA TÉRMICA E ISOLAMENTO TÉRMICO DA EDIFICAÇÃO EM CLIMAS QUENTES / 30**  
Vítor Freitas Mendes, Letícia Matias Martins e Júlia Castro Mendes

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO TÉRMICO DE DENSIFICAR DIVERSAS FORMAS URBANAS. ESTUDIO PARA UNA CIUDAD ÁRIDA DURANTE EL PERIODO DE VERANO / 36**  
María Belén Sosa, Erica Correa e María Alicia Cantón

**REHABILITACIÓN ENERGÉTICA EN BIBLIOTECA DEL MUSEO URIBURU EN SALTA A PARTIR DE SIMULACIÓN CALIBRADA CON MONITOREO HIGROTÉRMICO / 41**  
Camila Gea Salim, Silvana Flores Larsen, Marcos Hongn, Silvina González e Gabriel Gea

**TRATAMENTO DE DADOS CLIMÁTICOS DE ESTAÇÃO METEOROLÓGICA PARA OBTENÇÃO DE TRY E DIAS TÍPICOS DE PROJETO / 46**  
Fabiane Aparecida Santana Oliveira, Rovadávía Aline de Jesus Ribas e Adriano Pinto Gomes

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE SALAS DE AULAS DO INVERSU CONSIDERANDO ESTRATÉGIAS BIOCLIMÁTICAS / 51**  
Nathalia de La Silva Gomes, Rovadávía Aline de Jesus Ribas e Adriano Pinto Gomes

**DESENVOLVIMENTO DE ARQUÉTIPO DE EDIFÍCIO DE ESCRITÓRIOS COM VENTILAÇÃO HÍBRIDA: ABORDAGEM METODOLÓGICA PARA DESENVOLVIMENTO DE MODELO / 57**  
Ana Carolina de Oliveira Veloso, Charles Rodrigues Andrade Filho e Roberta Vieira Gonçalves de Souza

**ANÁLISE COMPARATIVA DE DOIS ALGORITMOS DE CONDUÇÃO TÉRMICA CTF E HAMT E OS RISCOS DE CONDENSAÇÃO EM UMA PAREDE HISTÓRICA COM BARREIRA DE VAPOR / 63**  
Maritza da Rocha Macarthy e Eduardo Grala da Cunha

**INTEGRACIÓN DE LA SIMULACIÓN MICROCLIMÁTICA EN ENVI-MET Y ENERGYPLUS PARA ANÁLISIS DE LA CARGA TÉRMICA EN EDIFICIOS RESIDENCIALES EN LA CIUDAD DE MONTEVIDEO / 69**  
Pascual Ceriani, Bianca Milani de Quadros e Martin Gabriel Ordenes Mizgier

**MODELO MATEMÁTICO SIMPLIFICADO PARA EL CÁLCULO DEL REQUERIMIENTO ENERGÉTICO A PARTIR DE SIMULACIONES PARAMÉTRICAS / 76**

María Victoria Mercado, Gustavo Barea e Andres Aceña

**JUSTE DE MODELO MATEMÁTICO DETED® POR MEDIO DEL ESTUDIO TÉRMICO DE UN EDIFICIO SIMPLE CON ENERGY PLUS / 82**

María Victoria Mercado, Julieta Balter e Hector Piriz

**ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE O CONSUMO ENERGÉTICO E OS VIDROS LAMINADOS, INSULADOS DUPLOS E TRIPLOS NO BRASIL / 88**

Paulyne Vaz Rocha e Martin Ordenes Mizgier

**AValiação DO POTENCIAL DE RESFRIAMENTO PASSIVO COM MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE EM UMA HABITAÇÃO SOCIAL NO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO/SP, BRASIL / 93**

Mariane Pinto Brandalise, Fernando Almeida e Martin Ordenes Migzier

**INFLUENCE OF FUTURE WEATHER FILES ON NBR15575 PERFORMANCE INDICATORS / 99**

Matheus K. Bracht, Marcelo S. Olinger, Vanessa A. C. da Costa, Ana Paula Melo e Roberto Lamberts

**PHASE CHANGE MATERIALS APPLICABILITY IN BRAZILIAN RESIDENTIAL ROOFS / 105**

Larissa Pereira de Souza, Matheus Körbes Bracht, Matheus Soares Geraldi, Mateus Bavaresco, Ana Paula Melo e Roberto Lamberts

**O IMPACTO DAS ESTRATÉGIAS DE CONTROLE SOLAR NO DESEMPENHO TÉRMICO DE UMA EDIFICAÇÃO RESIDENCIAL DE ACORDO COM A NBR 15575:2021 / 111**

Júlia Bagio, Larissa Pereira de Souza, Ana Paula Melo e Roberto Lamberts

**THE RESILIENCE OF BRAZILIAN SOCIAL HOUSING TO CLIMATE CHANGE / 117**

Alexandre Santana Cruz, Leopoldo Eurico Gonçalves Bastos, Vítor Freitas Mendes e Júlia Castro Mendes

**APORTE METODOLÓGICO AL CÁLCULO DE LA INFLUENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS ESTRATEGIAS PASIVAS DE EDIFICIOS / 123**

Gustavo J. Barea Paci e Carolina Ganem Karlem

**SIMULAÇÃO PARAMÉTRICA EXPLORATÓRIA DE SOLUÇÕES PARA ADEQUAÇÃO DE ENVOLTÓRIA COM FOCO EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA / 130**

Erick Fraiha Machado e Arthur Santos Silva

**SIMULAÇÃO DE ILUMINAÇÃO NATURAL CONFORME NBR 15.575 E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE EDIFICAÇÃO UTILIZANDO TECNOLOGIA BIM / 136**

Gabriela Sardinha Pacheco

**VIDROS DE CONTROLE SOLAR E INSULADOS EM HABITAÇÕES SOCIAIS: UM ESTUDO DE SIMULAÇÃO EM DIFERENTES LATITUDES / 140**

Laila Dutra da Rocha e Lucas Adler Rodrigues Procheira

**ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO DE ENVOLTÓRIA COM PCM EM CLIMAS TROPICAIS / 145**

Tássio Luiz dos Santos, Arthur Santos Silva e Diogo Duarte dos Reis

**INFLUÊNCIA NO DESEMPENHO TERMO ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES AO CONSIDERAR A ESTRUTURA COMO PONTE TÉRMICA NA ENVOLTÓRIA EM SIMULAÇÕES / 151**

Igor Sartori Schlichting, Matheus Soares Geraldi, Ana Paula Melo e Roberto Lamberts

**O RISCO ENTRE O MAU E O SUPERDIMENSIONAMENTO DAS SOLUÇÕES ACÚSTICAS AO CONSIDERAR OS VALORES DE REFERÊNCIA DA PRÓPRIA NORMA DE DESEMPENHO / 157**

Vitória Soares, Raquel Rossatto, Bárbara Fengler, Karina Sá e José Carlos Giner

**INFLUÊNCIA DA CONFIGURAÇÃO DIRECIONAL E ANGULAR DO SISTEMA DE AR-CONDICIONADO NA TEMPERATURA E VELOCIDADE DO AR / 162**

Brenda da Costa Loeser, Liége Garlet, Natasha Hansen Gapski, Mateus Bavaresco, Ana Paula Melo e Roberto Lamberts

**CONVECTIVE HEAT BALANCE APPLIED TO THERMAL PERFORMANCE ANALYSIS OF BUILDINGS / 168**

Letícia Gabriela Eli, Ana Paula Melo e Roberto Lamberts

**APLICAÇÃO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL NO ENSINO DE SIMULAÇÃO DE DESEMPENHO ENERGÉTICO / 173**

Fernando Simon Westphal e Lucas Adler Rodrigues Procheira

**DESEMPENHO TÉRMICO DE UMA HIS NO SUL DO PAÍS: ANALISANDO A TRANSFERÊNCIA DE CALOR E O TRANSPORTE DE UMIDADE / 178**

Luciane Andreola Beber, Carolina de Mesquita Duarte, Luiza Coutinho Bernardes, Bianca Pereira Lucas, Maritza da Rocha Macarthy, Talita Marini Brandelli, Eduardo Grala da Cunha e Antonio Cesar Silveira Baptista da Silva

**INTERNAL CONVECTION ALGORITHM IMPACT ON THERMAL COMFORT ASSESSMENT IN OFFICE ROOMS THROUGH COMPUTER SIMULATION ON ENERGYPLUS / 183**

Mônica Martins Pinto e Fernando Simon Westphal

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ORIENTAÇÃO SOLAR EM HABITAÇÕES DE INTERESSE SOCIAL PARA DIFERENTES CLIMAS DO BRASIL / 189**

Clara Zibetti Matuella Veiga, Larissa Pereira de Souza e Roberto Lamberts

**CFD-BASED WIND PRESSURE COEFFICIENTS ON BUILDING FACADES WITH BUTTERFLY/OPENFOAM FOR AIRFLOW NETWORK MODELS / 195**

Nayara R. M. Sakiyama, Joyce C. Carlo, Jurgen Frick e Harald Garrecht

**ANÁLISE DE DESEMPENHO TÉRMICO: COMPARAÇÃO ENTRE AS VERSÕES DE 2013 E 2021 DA NBR 15.575-1 / 200**

Caroline Viana de Souza, Caroline Casarin Lohnhoff, Larissa Azevedo Luiz, Cristiane Rossatto Cândido e Raquel Sanches

**ANÁLISE DO TEMPO DE ESTABILIZAÇÃO DO AMBIENTE TÉRMICO DE UMA CÂMARA CLIMÁTICA EM FLORIANÓPOLIS/SC POR MEIO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL / 206**

Natasha Hansen Gapski, Liége Garlet, Brenda da Costa Loeser, Mateus Vinícius Bavaresco, Ana Paula Melo e Roberto Lamberts

**SIMULAÇÃO COMO INSTRUMENTO PARA MELHORAR O DESEMPENHO DA EDIFICAÇÃO E O CONFORTO DO USUÁRIO: O CASO DO AEROPORTO DE MACAÉ / 211**

Cristiane Rossatto Candido, Caroline Casarin Lohnhoff, Caroline Viana de Souza, Larissa Azevedo Luiz e Raquel Sanches

**OS EFEITOS NÃO VISUAIS DA LUZ E O DESEMPENHO DE EDIFÍCIOS  
HABITACIONAIS / 217**

Amanda Camuzato de Quadros, Raphaela Walger da Fonseca e Fernando Oscar Ruttkay Pereira

**THE NEW CALCULATION METHOD OF *tcl* (CLOTHING SURFACE TEMPERATURE) IN  
THERMAL COMFORT / 223**

Anneli Maricielo Cárdenas Celis e José Walter Cárdenas Sotil

**MODELO DE MICROCLIMA URBANO PARA VALPARAÍSO, CHILE. ADAPTACIÓN DEL  
MODELO DE CLIMA URBANO DEL ÁREA DE EIXAMPLE DE LA CIUDAD DE  
BARCELONA / 227**

Claudio Carrasco, Massimo Palme e Antonio Isalgué

**IMPACT OF ADOPTING SIMPLIFIED THERMAL LOAD MODELS IN THE SIMULATION  
OF THERMAL ENERGY STORAGE INTEGRATED INTO AIR-SOURCE  
HEAT PUMPS / 232**

Conrado Ermel, Marcus M.V.A. Bianchi, Lara W. Vieira e Paulo S. Schneider



## Infraestructura verde para la reducción de los consumos energéticos de refrigeración de edificios en climas mediterráneos

Massimo Palme<sup>1</sup> and Claudio Carrasco<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Arquitectura

<sup>2</sup>Universidad de Valparaíso, Facultad de Ingeniería, Escuela de Construcción

### Abstract

El impacto del cambio climático en las ciudades y el calentamiento urbano debido a efectos antropogénicos son fenómenos que requieren urgente intervención. Una de las estrategias mejores de mitigación del calor urbano es la infraestructura verde, bajo todas sus formas de aplicación: techos y fachadas verdes, parques, pasto y árboles. Este artículo analiza la reducción que se puede obtener en las cargas de refrigeración utilizando arbolado urbano para sombrear las fachadas de edificios en climas mediterráneos. Las demandas de energía han sido obtenidas mediante simulación con el software TRNSYS versión 17 y sucesivamente se ha realizado un modelo predictivo con técnicas de aprendizaje máquina en software R para obtener de manera rápida una estimación de los ahorros obtenibles en función de parámetros fácilmente medibles en visitas a terreno. Los resultados muestran una reducción de las cargas de refrigeración obtenible en el rango 5-40% y un buen desempeño predictivo de los algoritmos empleados.

### Introduction

El calor urbano es un problema muy relevante hoy en día, debido al gran porcentaje de seres humanos que viven en ciudades, muchas de las cuales se localizan en entornos calurosos, sean húmedos o áridos, o como mínimo caracterizados por tener una estación calurosa. En tales lugares, los impactos del cambio climático pueden ser muy superiores que en los entornos rurales (Stone, 2012).

El clima mediterráneo (Peel et al. 2015) es un clima que se encuentra principalmente entre las latitudes 30 y 45, tanto en el hemisferio norte como en el sur, degradando desde un clima continental templado hasta un clima semiárido frío. Su localización geográfica depende de los movimientos de las corrientes de aire y de agua del planeta, y se encuentra prevalentemente en las costas de los océanos bañadas por corrientes frías. En la figura 1 se puede apreciar la distribución de los climas mediterráneos en América del Norte (costa pacífica desde la península de California hasta Canadá), América del Sur (Chile y partes de Argentina), Australia (costa índica), Sur África (costa atlántica) y Europa (todo el Mar Mediterráneo e influencias en alrededores).

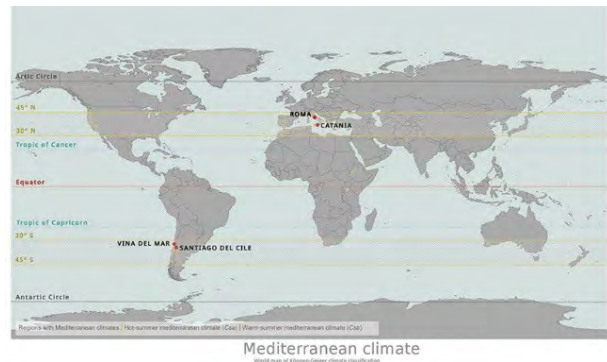


Figura 1: Climas mediterráneos y ciudades de estudio.

La infraestructura verde urbana es una estrategia de mitigación del calor urbano (Tiwari et al. 2021) que permite además alcanzar muchos otros objetivos: la producción de oxígeno y el secuestro de carbono, la reducción de la contaminación acústica y visual de las ciudades, la generación de espacios para la biodiversidad y eventualmente de corredores naturales a través de las ciudades, la proporción a los habitantes de lugares de esparcimiento y diversión (Givoni 1991). Por lo tanto, su desarrollo intensivo debe ser facilitado, a través de herramientas de apoyo a los planificadores que les permitan estimar los beneficios obtenibles con facilidad. Una manera típica de obtener predicciones sobre el consumo energético de los edificios es la realización de simulaciones a través de softwares especializados. En general, estos procesos de creación de modelos y simulación requieren cierto tiempo de ejecución y cierta experiencia necesaria para realizarlos. Sin embargo, técnicas de aprendizaje máquina podrían permitir obtener, sobre la base de un set de simulaciones previamente desarrollado, resultados estimativos de los ahorros energéticos obtenibles a través de la plantación de árboles a partir de datos objetivos fácilmente observables, como son por ejemplo la orientación y el tamaño de los edificios objeto de la intervención o la tipología y morfología de los árboles que se proyecta plantar. El aprendizaje máquina ya se ha aplicado a la planificación urbana en diferentes ámbitos, incluyendo el desempeño energético (Palme et al. 2020).

## Metodología

Para la obtención de los resultados deseados, se ha aplicado una metodología de tres etapas. Primariamente, se han seleccionado cuatro ciudades como casos de estudio y en cada una de ellas se han determinado barrios específicos a ser analizados. Estos barrios han sido examinados para determinar una muestra representativa de configuraciones edificios-árboles que será objeto de las simulaciones. Los barrios han sido caracterizados en términos de su intensidad de isla de calor y se han generado archivos climáticos urbanos para ser utilizados en simulaciones a través de la herramienta Urban Weather Generator. (Bueno et al. 2012, Mao y Nordford 2021). Sucesivamente, las configuraciones elegidas como muestra han sido simuladas con y sin la presencia de vegetación a través de la herramienta TRNSYS versión 17. Finalmente, los resultados de las simulaciones han sido clasificados en función de determinados parámetros predictivos, tales como la distancia entre árboles y edificios, la forma en planta de los edificios, la altura de estos, la orientación de la fachada principal y la morfología de los árboles.

## Selección de las configuraciones

Las ciudades elegidas para el estudio son: Catania y Roma en Italia y Santiago y Viña del Mar en Chile. Estas ciudades tienen similares condiciones macro climáticas pero diferentes características meso y micro climáticas. Viña del Mar se beneficia del efecto enfriador del Océano Pacífico, que es notablemente más fuerte respecto al Mar Mediterráneo que enfría la ciudad de Catania. Santiago y Roma comparten una condición algo más continental, situándose a una distancia de algunos kilómetros de la costa. Santiago, por su tamaño y población, resiente de un calor antropogénico más elevado que los otros casos de estudio. Los barrios analizados, por otra parte, son todos comparables por ser barrios periurbanos, colocados en los márgenes de crecimiento de las ciudades objeto del estudio. Su construcción fue realizada entre 1960 en el caso de Catania y 2010 en el caso de Santiago.

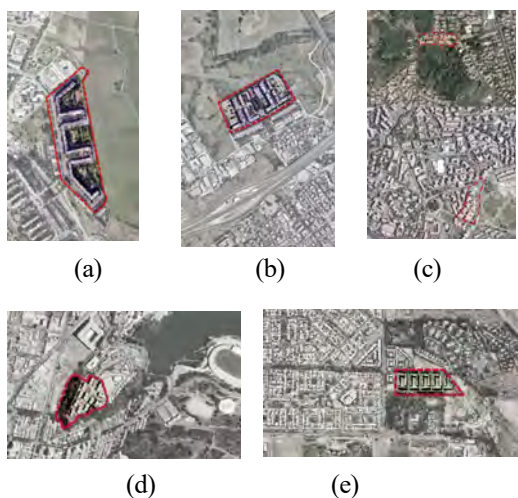


Figura 1: casos de estudio analizados: Tor Bella Monaca (a), Casale Caletto (b), Trimesteri Etneo (c), Benidorm (d) y Las Condes (e)

## Simulación de desempeño

Las simulaciones se realizaron en diferentes fases. Primariamente se realizó una simulación urbana para obtener los archivos meteorológicos apropiados para la siguiente simulación de desempeño de edificios. Los parámetros urbanos necesarios a la simulación UWG se obtuvieron a través del análisis por sistemas de información geográfica satelital de la configuración de los barrios objeto del estudio. La tabla 1 reporta los valores de los parámetros principales utilizados en UWG.

Tabla 1: Parámetros utilizados en la simulación UWG

Localidad	Area		Relac.	H	Area
	constr.	fachad			
Tor Bella Monaca	0.11	2.64	24	0.25	
Casale Caletto	0.12	0.62	15	0.08	
Trimesteri Etneo	0.19	0.88	12	0.05	
Les Condes	0.15	0.73	15	0.27	
Benidorm	0.07	0.36	12	0.24	

Sucesivamente, las configuraciones elegidas fueron modeladas en cuanto a la relación entre árboles y edificios. Se establecieron las distancias mínimas entre hileras de árboles y fachadas y se determinaron los coeficientes de permeabilidad solar de tres tipologías arbóreas diferentes, así como morfologías típicas de las especies consideradas. La permeabilidad solar fue evaluada gracias a imágenes ojo de pez analizadas con el software Gap Light Analyzer (GLA, ).

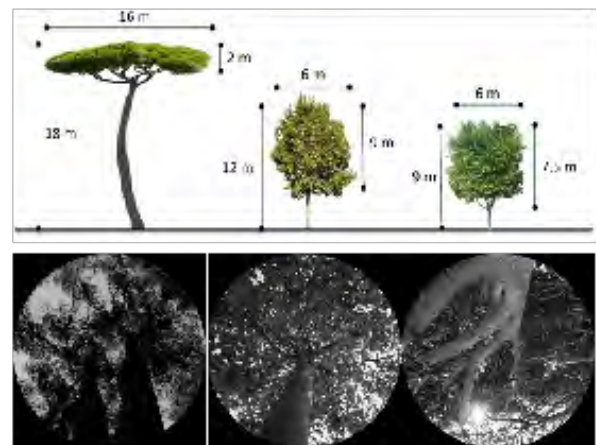


Figura 2: morfología de los árboles e imágenes ojo de pez utilizadas para obtener la permeabilidad solar

Finalmente, los edificios considerados fueron modelados en TRNSYS y simulados con y sin la presencia de los árboles.

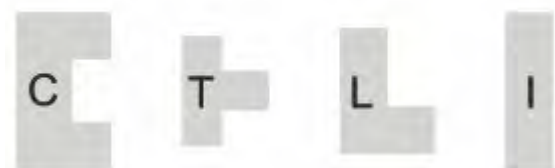


Figura 3: morfologías en planta de las tipologías simuladas

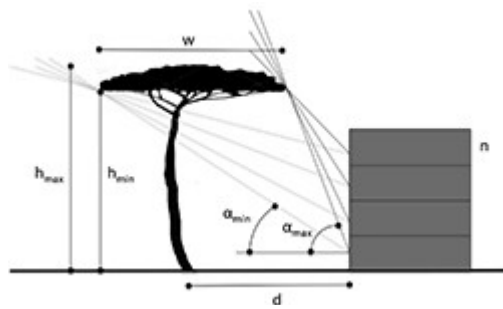


Figura 4: Relaciones angulares entre árboles y edificios

Tabla 2: propiedades de los materiales

Elemento	Construcción	Transmitancia térmica (W/m²K)	Absorción solar
Paredes	Ladrillo - XPS	0.56	0.60
Cubiertas	Conc. - XPS	0.32	0.60
Ventanas	Alum. single	5.80	0.86

Tabla 3: relación Ventana/pared

Forma	Superficie	Relación Ventana/pared fachada principal	Relación Ventana/pared otras fachadas
I	480 m²	20%	7%
C	800 m²	20%	20%
T	400 m²	20%	15%
L	528 m²	20%	20%

Tabla 4: parámetros de operación

Descripción	Horarios	Valores
Iluminación	18-22 h	5 W/m²
Enfriamiento	0-24 h	26 °C
Metabolismo	0-24 h	1 met
Personas	0-24 h	50 m²/p
Protección solar abre	120 W/m²	1.0
Protección solar cierra	140 W/m²	0.4

### Aprendizaje máquina

El aprendizaje máquina es una técnica utilizada para reconocimiento de patrones de forma supervisada o no supervisada a través de computadoras. Para ello, se establecen ciertos parámetros como predictores y se genera una base de datos de resultados para entrenar la máquina y verificar su capacidad de realizar predicciones acuradas. Existen diferentes tipos de algoritmos que se pueden utilizar, en este trabajo se testearon Knn, Loess, Glm, Random forest y una combinación de los cuatro anteriores. Como predictores, se utilizaron la clasificación climática, la tipología de entorno urbano, altura sobre el nivel del mar, distancia del mar, latitud, número de pisos, número de fachadas en sombra, forma en planta del edificio, orientación, distancia árboles-fachada, especie arbórea.

El proceso de aprendizaje se llevó a cabo con el software “R”, utilizando un conjunto de 140 resultados de simulación, divididos en un set para entrenar el algoritmo de 105 casos y un set para testear la precisión de 35 casos. Se ha seguido el enfoque anteriormente utilizado (Palme et al., 2021) y validado para una muestra menor en un solo emplazamiento.

### Resultados

#### Intensidad de isla de calor

Los resultados de las simulaciones UWG muestran una intensidad máxima del fenómeno isla de calor de entre 2 y 6 grados centígrados en los barrios analizados. El caso de Santiago muestra una intensidad mayor debido probablemente a la mayor altura de los edificios del sector y al mayor tamaño de la ciudad.

Tabla 5: intensidad de la isla de calor en las localidades simuladas

Localidad	Max UHI	Min UHI
Tor Bella Monaca	3.7	-1.0
Casale Caletto	2.4	0.6
Trimesteri Etneo	2.8	-1.1
Les Condes	6.1	-1.5
Benidorm	2.0	-0.4

#### Simulación de desempeño de los edificios

Los resultados obtenidos muestran ahorros obtenibles gracias a la colocación de hileras de árboles en frente a las fachadas en el rango 5-60%. Los ahorros mayores se han obtenido para el caso de Benidorm, en Viña del Mar, localidad para la cual se registraron también las demandas energéticas más bajas del caso base sin sombrear. La tipología de árbol que proporcionó mejores resultados fue la del *pinus pinaster*, que tiene mayor altura y capacidad de sombrear más fachadas de los edificios. Los resultados están alineados con los obtenidos en trabajos anteriores (Balogun et al. 2014, Laband y Sophocleus 2009, Clemente et al. 2022).

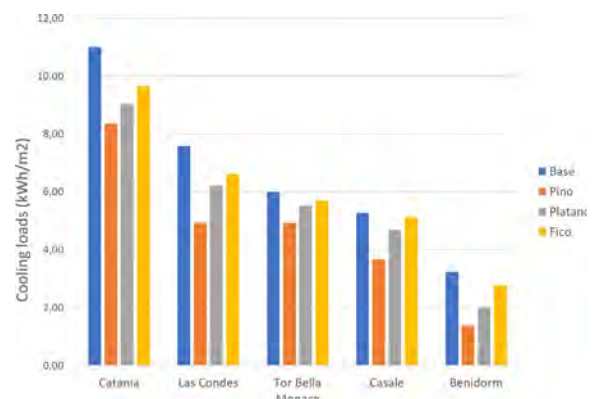


Figura 5: Ahorros obtenibles con uso de infraestructura verde.

## Aprendizaje máquina

A través del proceso de aprendizaje máquina, se hicieron dos pruebas diferentes. Primero se clasificaron los casos analizados en dos categorías, según alcanzaran o no el ahorro mínimo del 15%; después se clasificaron los casos considerados en cinco categorías de ahorro: 0-5%; 5-15%; 15-25%; 25-35% y >35%. Los resultados obtenidos por las diferentes configuraciones se presentan en la tabla 5.

Lo más interesante de todo, es la precisión del proceso predictivo. Utilizando un ensamblaje de algoritmos, se obtuvieron precisiones del 96% en el caso de la clasificación binaria, y del 74% en el caso de las cinco categorías.

Tabla 6: clasificación de ahorros según configuración

Localidad	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
Bella Monaca	3	7	1	0	1
Casale	2	14	8	0	6
Trimesteri	1	5	3	1	2
Les Condes	0	11	5	9	3
Benidorm	0	2	12	10	22
TOTAL CASES	6	39	29	20	26

## Conclusión

Este trabajo ha investigado la posibilidad de usar estrategias de aprendizaje máquina para predecir los ahorros obtenibles debido al efecto de la sombra de árboles en fachada de edificios para climas mediterráneos. La posibilidad de obtener resultados confiables facilitaría el trabajo de planificación, evitando la necesidad de realizar simulaciones complejas que requieren de mucho tiempo y de la participación de expertos. Los resultados obtenidos han mostrado que la precisión obtenida en las predicciones es más que aceptable, validando la metodología a lo menos para climas templados. Más estudios serán necesarios para extender la utilidad de la metodología en otros climas.

## Agradecimientos

Este trabajo se hizo bajo el auspicio del Proyecto Fondecyt 1200275 "Clima urbano y medio construido"

## Referencias

- Stone, B. (2012). The city and the coming climate. Climate change in the places we live. Cambridge University Press.
- Balogun, A. A., Morakinyo, T. E. and Adegun, O. B. (2014), "Effect of tree-shading on energy demand of two similar buildings", in Energy Buildings, vol. 81, pp. 305-315.
- Bueno, B., Norford, L., Hidalgo, J., Pigeon, G. (2012). The urban weather generator. Journal of Building Performance Simulation 6 (4), 1-13
- Clemente, C., Palme, M., Mangiatordi, A., Privitera, R., La Rosa, D. (2022). Urban green areas in the reduction of cooling loads. Simulations in the Mediterranean climate. Agathon, 11, 182-191
- Givoni, B. (1991), "Impact of planted areas on urban environmental quality – A review", in Atmospheric Environment – Part B – Urban Atmosphere, vol. 25, issue 3, pp. 289-299
- Laband, D. and Sophocleus, V. (2009), "An experimental analysis of the impact of tree shade impacts on electricity consumption", in Arboriculture & Urban Forestry, vol. 35, issue 4, pp. 197-202
- Mao, J. and Norford, L. (2021). Urban weather generator: physics-based, microclimate simulation for performance-oriented urban planning. In: Urban Microclimate Modelling for Comfort and Energy Studies, Springer Ed.
- Palme, M., Privitera, R., La Rosa, D. (2020). The shading effects of Green Infrastructure in private residential areas: Building Performance Simulation to support urban planning. Energy and Buildings 229, 110531
- Palme, M., Carrasco, C., Privitera, R., La Rosa, D. (2021). Building Performance Simulation to support tree planting for cooling needs reduction: a machine learning approach. Proceedings of the Building Simulation Conference, Brujas, Septiembre 2021
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. Hydrology and Earth Systems Sciences 4, 439-473
- Tiwari, A., Kumar, P., Kalaiarasan, G. and Ottosen, T.-B. (2021), "The impacts of existing and hypothetical green infrastructure scenarios on urban heat island formation", in Environmental Pollution, vol. 274, 115898, pp. 1-14.

## Impacto do uso de diferentes arquivos climáticos na classificação de eficiência energética da envoltória de uma edificação segundo a INI-R: o caso de Viçosa-MG

Mario Alves da Silva, Joyce Correna Carlo

Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil

### Resumo

Durante a avaliação de desempenho de edificações residenciais para a obtenção da etiqueta, segundo o método proposto pela INI-R, o simulador precisa fornecer um arquivo climático para a simulação, a fim de obter o desempenho da edificação avaliada e o uso de diferentes formatos pode acarretar em diferentes classificações. Este trabalho tem por objetivo avaliar o impacto do uso de diferentes arquivos climáticos na classificação de eficiência energética da envoltória de um modelo de habitação unifamiliar. O método foi baseado na avaliação de um modelo unifamiliar simulado segundo o método da INI-R, com 6 arquivos climáticos diferentes para uma mesma localidade. Os resultados apontaram que os arquivos proporcionaram classificação A e B, a depender do formato escolhido. Observou-se ainda uma variação significativa entre as estimativas de carga térmica para os modelos que utilizam arquivos climáticos com dados do INMET e arquivos gerados com as bases ISD + ERA5.

### Introdução

Simulações de desempenho termoenergético de edificações utilizam arquivos climáticos a fim de obter resultados confiáveis e comparáveis a situações in loco. Os programas de simulação necessitam emular as condições climáticas do local para que seja feita a avaliação de desempenho de acordo com as características ambientais do local no qual a edificação está inserida.

Arquivos climáticos são bancos de dados que compreendem informações acerca de diferentes variáveis climáticas. Os arquivos são criados a partir de algum tratamento estatístico que é aplicado aos dados meteorológicos brutos, a fim de selecionar os dados horários que compõe o arquivo climático. Existem diferentes formatos de arquivos climáticos, que acarretam resumos climáticos com diferentes níveis de representatividade. Arquivos climáticos descrevem as condições climáticas de uma localidade específica. Quando aplicados a processos de simulação de edificações, diferentes arquivos climáticos resultam em diferentes resultados (CRAWLEY, 1998). A qualidade dos dados climáticos afeta diretamente a qualidade dos resultados obtidos, dado que bases com dados mais próximos das condições reais proporcionam resultados mais confiáveis (BHANDARI et al., 2012).

Guimarães (2016) simulou 16 metamodelos de edificações utilizando uma série temporal de 10 anos para Viçosa-MG, a fim de identificar variações nas cargas de aquecimento e resfriamento, a partir de diferentes formatos de arquivos climáticos: Multianual 2 anos, Multianual 3 anos, Multianual 10 anos, TRY, TRY-eu, TMY-br, WYEC2 e TMY3. A partir de uma análise de sensibilidade, constatou-se que os arquivos TMY3 e Multianual 3 anos apresentaram maior similaridade com a série de 10 anos, sendo mais indicados para a simulação de edificações comerciais com condicionamento artificial. No entanto, não foram feitas análises sobre o impacto de diferentes formatos no desempenho de edificações residenciais.

Após a crise energética brasileira nos anos 2000, houve uma necessidade de criação de instrumentos para regulamentação do consumo energético, a fim de promover reduções no uso energético de edificações. Além disso houve um crescimento no uso de métodos computacionais para avaliação do desempenho de edificações no Brasil (MENDES et al., 2005). A criação de regulamentos e normas, promoveram processos metodológicos para que fossem feitas análises acerca do desempenho de edificações, de acordo com padrões mínimos de desempenho estabelecidos (ABNT, 2021; CARLO, LAMBERTS, 2008; MELO et al., 2016). A Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (INI-R) (INMETRO, 2022), apresenta diferentes métodos de avaliação de desempenho de edificações residenciais, todos alinhados com os processos metodológicos de avaliação da NBR15575 (ABNT, 2021).

Dentre os métodos disponíveis de avaliação, a INI-R propõe três alternativas: o método prescritivo, alinhado com as recomendações da NBR15220; o método simplificado que utiliza processo de aproximação e *machine learning* para prever o desempenho de uma edificação residências, a partir de um banco de dados de edificações simuladas; e, por fim, o método de simulação, que permite a simulação de características não compreendidas no método simplificado. Tanto o método simplificado quanto o método de simulação utilizam arquivos climáticos para a obtenção do desempenho da edificação. No entanto, no método simplificado o usuário não pode utilizar diferentes arquivos climáticos para uma mesma localidade, dado que somente é escolhida a localização e o arquivo é escolhido dentro da

programação do método. No método de simulação, o usuário tem a possibilidade de utilizar diferentes arquivos climáticos. Deste modo, este trabalho buscou avaliar o impacto do uso de arquivos climáticos, produzidos a partir de diferentes métodos e séries temporais, na classificação de eficiência energética da envoltória de uma edificação unifamiliar térrea, segundo o método de simulação da INI-R.

## Metodologia

### Seleção dos arquivos climáticos

Foram selecionados seis arquivos climáticos para a cidade de Viçosa-MG com diferentes recortes temporais. São eles: TMYx-Ap, com dados de 1995-2001; INMET, com dados de 2001-2010; TMY e TMY3, com dados de 2006-2015; TMY3n, com dados de 2006-2021; e TMYx, com dados de 2016-2021. Os arquivos TMYx\_Ap, INMET e TMYx estão disponíveis no repositório Climate One Building (LAWRIE, CRAWLEY, 2019). Os arquivos da base Climate One Building contêm dados das bases Integrated Surface Database (ISD) e ERA5. A base ISD, para a localidade de Viçosa, MG, contém dados medidos pela estação automática do INMET para as variáveis Temperatura de Bulbo Seco (TBS), Temperatura de Ponto de Orvalho (TPO), umidade relativa (UR), pressão atmosférica (Pa), velocidade do vento (Vel), direção do vento (Dir). Apesar das estações do INMET registrarem dados horários de radiação global horizontal (RG), os arquivos disponíveis no repositório *Climate One Building*

utilizam dados de radiação provenientes da base de dados ERA5. Todos os demais arquivos climáticos utilizam somente dados INMET.

A partir da análise dos dados mensais de TBS, UR e radiação (global, difusa e direta) observou-se que o arquivo TMY3n apresenta valores médios entre os demais, para a TBS (Figura 1). Com relação à UR o arquivo TMYx-Ap apresenta as maiores variações em relação à média do grupo, para o mês de setembro (Figura 2). Quanto à radiação, observou-se que, para a radiação global, o formato TMY3n apresenta os menores valores para os meses de março e julho, e o formato TMYx-Ap apresenta valores extremos para o mês de fevereiro. Com relação à radiação difusa, observa-se que o formato TMY3n possui dados intermediários, entre os arquivos gerados a partir de dados do INMET (TMY, TMY3 e INMET) e os arquivos que utilizam dados das bases ISD + ERA5 (Figura 3). Quanto à radiação direta normal, novamente o formato TMY3n apresentou valores intermediários aos formatos gerados com dados INMET e ISD + ERA5, no entanto, enquanto os formatos gerados com o banco de dados brasileiro possuem valores mensais máximos próximos a 2500 kWh/m<sup>2</sup>, os arquivos TMYx e TMYx-Ap variam entre 3194 kWh/m<sup>2</sup> e 6222 kWh/m<sup>2</sup>.

Foram analisados também se os dados horários de radiação global horizontal em todos os arquivos, a fim de identificar se os valores não eram superiores à radiação extraterrestre horizontal.

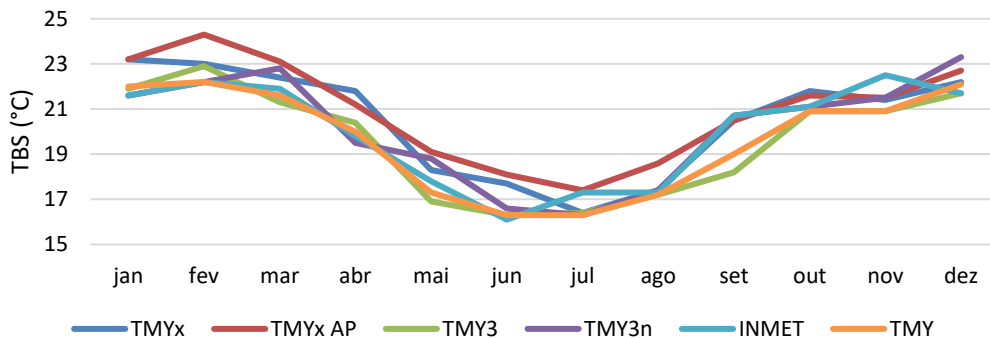


Figura 1: Média mensal de TBS

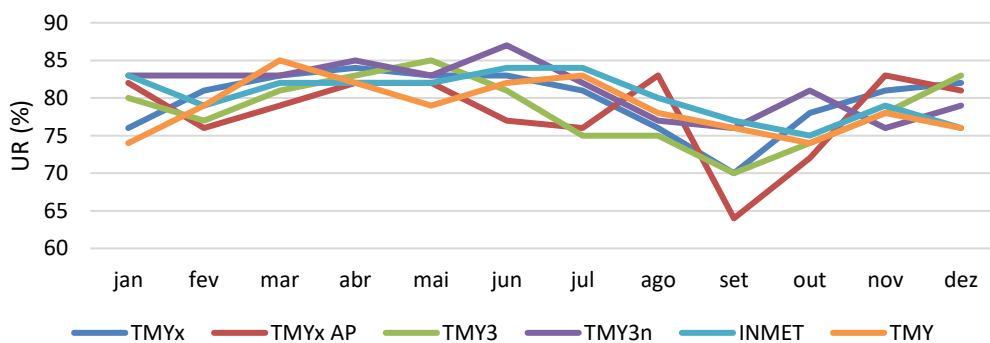


Figura 2: Média mensal da Umidade Relativa

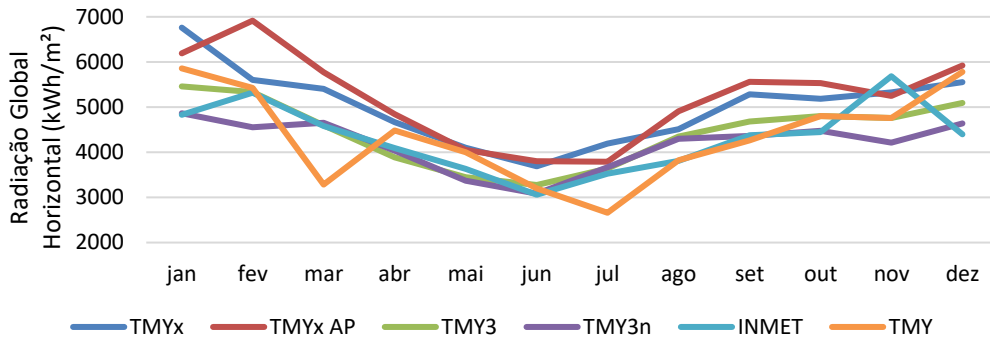


Figura 3: Média mensal de Radiação Global Horizontal

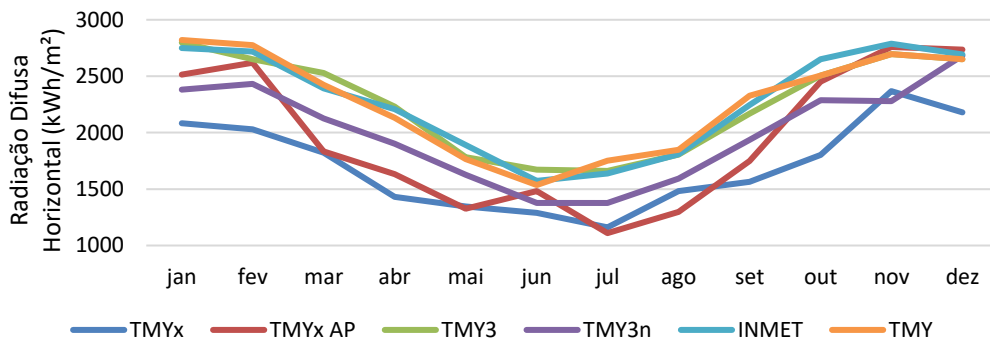


Figura 4: Média mensal de Radiação Difusa Horizontal

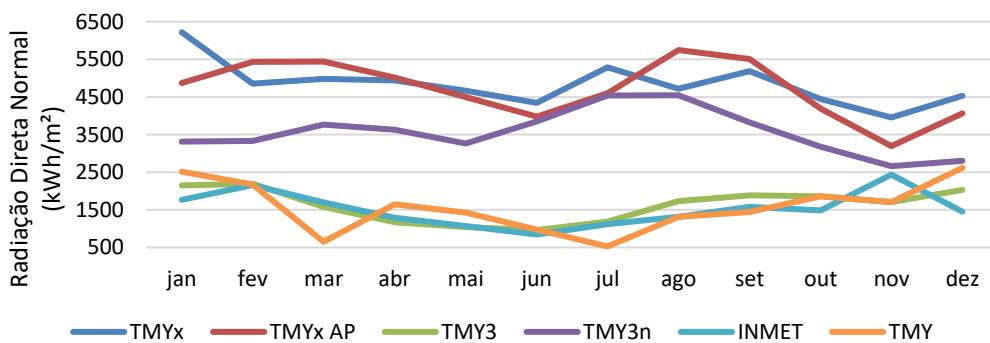


Figura 5: Média mensal de Radiação Direta Normal

A partir da verificação dos valores de radiação global horizontal e da radiação extraterrestre horizontal, verificou-se que os arquivos TMYx e TMYx-Ap possuem, respectivamente, 1036 e 566 horas nas quais a radiação global é maior que a extraterrestre.

#### INI-R: método de simulação

Para o processo de simulação, foi utilizado um modelo unifamiliar representativo de uma habitação de interesse

social térrea presente nos estudos de Triana et al. (2015) e disponibilizado pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina. O modelo disponibilizado para simulação no software EnergyPlus 9.0 está configurado de acordo com o modelo de referência do método de simulação proposto pela NBR 15575, que é a base para o método de simulação estabelecido pela INI-R. O caso real, teve suas características definidas pelos autores (Tabela 1).

Tabela 1: Características dos modelos real e de referência

	Referência	Real
Paredes	Placa de concreto com 10cm (U = 4,4 W/(m <sup>2</sup> K); CT = 240 kJ/m <sup>2</sup> K)	Parede de tijolo cerâmico 6 furos com argamassa interna e externa (U = 2,39 W/(m <sup>2</sup> K); CT = 150 kJ/m <sup>2</sup> K)
Cobertura	Laje de concreto de 10cm, câmara de ar e telha cerâmica 6mm (U = 2,05 W/(m <sup>2</sup> K); CT = 238 kJ/m <sup>2</sup> K)	Laje pré-moldada EPS com revestimento interno de argamassa, câmara de ar e telha cerâmica (U = 1,26 W/(m <sup>2</sup> K); CT = 150 kJ/m <sup>2</sup> K)
Piso	Laje de concreto com 10cm (U = 5,07 W/(m <sup>2</sup> K); CT = 220 kJ/m <sup>2</sup> K)	Laje de concreto com 10cm, contra piso e piso cerâmico (U = 4,43 W/(m <sup>2</sup> K); CT = 282 kJ/m <sup>2</sup> K)
Absortância solar das paredes	0,58	0,30
Absortância solar da cobertura	0,65	0,50
Beiral	-	60 cm
Área operável da janela <sup>1</sup>	0,45	0,75

Para a classificação da envoltória, a UH é avaliada a partir da diferença entre os modelos real e de referência, ambos sob os regimes de ventilação natural e condicionamento artificial. Em todas as situações, são avaliados somente os ambientes de permanência prolongada (APPs). Após o processo de simulação, são avaliados o percentual de

horas ocupadas dentro de uma determinada faixa de temperatura operativa (PHFT), as temperaturas operativas máxima (T<sub>Omáx</sub>) e mínima (T<sub>Omín</sub>) da UH, e a carga térmica total da UH (C<sub>gTT</sub>). Dada a temperatura média anual de Viçosa, MG ser inferior a 25°C, uma faixa de temperatura operativa entre 18°C e 26°C foi analisada.

## Resultados e discussão

A Tabela 2 apresenta os resultados da classificação de eficiência energética a partir da avaliação dos indicadores T<sub>Omáx</sub> e T<sub>Omín</sub>. A partir dos resultados, observa-se que a simulação utilizando o arquivo TMY<sub>x</sub> apresenta a maior temperatura operativa anual e o uso do arquivo TMY3 resulta na UH com menor valor para a temperatura operativa máxima anual. Para a temperatura operativa mínima, o arquivo TMY<sub>x</sub>-Ap resulta na UH com maior valor e o arquivo TMY3 atinge o menor valor. Quanto aos critérios de elegibilidade para as classes A, B, C e D, observa-se que, com relação a T<sub>Omáx</sub> anual, o uso de qualquer um dos arquivos resultou em modelos reais com

uma diferença média de 4,06°C, quando comparados ao valor obtido pelo modelo de referência juntamente com a tolerância. Quanto à análise da T<sub>Omín</sub> tem-se que a média da diferença foi de 0,49°C, quando comparados os valores obtidos pelos modelos reais e pelas referências, juntamente com a tolerância. O uso do formato TMY<sub>x</sub> apresentou a menor diferença, de apenas 0,26°C. Sendo assim, a configuração adotada para o modelo real, obteve resultados elegíveis a classe A, no entanto próximos a uma situação que poderia não satisfazer o critério de T<sub>Omín</sub> e resultar em uma classificação E.

 Tabela 2: Classificação de eficiência energética da UH segundo os critérios de T<sub>Omáx</sub> e T<sub>Omín</sub>

	TMY <sub>x</sub> -Ap	INMET	TMY <sub>x</sub>	TMY	TMY3	TMY3n
T <sub>Omáx,real</sub>	33,81	30,57	34,36	32,48	30,20	32,32
T <sub>Omáx,ref</sub> + ΔT <sub>Omáx</sub>	38,43	34,54	38,38	36,75	34,00	36,04
T <sub>Omín,real</sub>	17,00	15,94	16,92	15,14	14,08	15,98
T <sub>Omín,ref</sub> - ΔT <sub>Omáx</sub>	16,26	15,39	16,67	14,37	13,51	15,68
Classe	A	A	A	A	A	A

Quanto à classificação, segundo o critério de PHFT, todos os formatos também obtiveram elegibilidade à classe A (Tabela 3). Observa-se que os arquivos TMY<sub>x</sub> e TMY<sub>x</sub>-Ap, formados com dados das bases ISD e ERA5, possuem as maiores variações entre o modelo real e referência, com

melhorias mais significativas com as mudanças de componentes construtivos, maior área de ventilação e cobertura com beiral. Os formatos criados somente com os dados de estações automáticas do INMET apresentam as menores variações, principalmente os formatos TMY e TMY3.

<sup>1</sup> Somente no modelo com ventilação natural.



Tabela 3: Classificação de eficiência energética da UH segundo o critério PHFT

	TMYx-Ap	INMET	TMYx	TMY	TMY3	TMY3n
PHFT <sub>real</sub> (%)	77,75	88,48	77,75	83,15	83,06	86,26
PHFT <sub>ref</sub> (%)	59,77	80,03	56,92	78,98	79,39	76,56
$\Delta$ PHFT	17,98	8,45	20,83	4,17	3,67	9,71
$\Delta$ PHFT <sub>min</sub>	10,33	0	11,99	0	0	0
Classe	A	A	A	A	A	A

O último passo consiste na avaliação da redução da CgTT da envoltória, a fim de estabelecer a sua classificação final (Tabela 4). Em média, os modelos obtiveram 52,16% de redução na CgTT. No entanto, a relação CgTT<sub>ref</sub>/Ap define a redução necessária para obtenção da Classe A. Para relações inferiores a 100 kWh/m<sup>2</sup>.ano, a redução mínima deve ser de 35% e, para relações iguais ou

superiores a 100 kWh/m<sup>2</sup>.ano, a redução mínima deve ser de 55%. De acordo com os resultados, todos os modelos simulados com arquivos climáticos que possuem somente dados de estações INMET obtiveram nível A, com redução média de 53,65% na CgTT da envoltória. Os demais modelos, obtiveram nível B pois, apesar da alta redução, ela foi inferior ao valor mínimo necessário.

Tabela 4: Classificação de eficiência energética da UH segundo o critério CgTT

	TMYx-Ap	INMET	TMYx	TMY	TMY3	TMY3n
CgTT <sub>real</sub> (kWh)	2474,20	897,65	2535,98	901,59	896,62	1277,21
CgTT <sub>ref</sub> (kWh)	5089,03	2117,81	5046,62	1880,59	1838,00	2758,60
CgTT <sub>ref</sub> /Ap (kWh/(m <sup>2</sup> .ano))	130,87	54,89	130,81	48,75	47,64	71,50
RedCgTT (%)	51,00	57,61	49,75	52,06	51,22	53,70
Classe	B	A	B	A	A	A

A partir dos resultados obtidos, observa-se que os arquivos que combinam dados das bases ISD e ERA5 (TMYx-Ap e TMYx) apresentam PHFT inferiores de e CgTT superiores. Além disso, tais arquivos resultam em uma classificação menos eficiente da envoltória. Considerando-se os resultados dos processos de simulação como uma estimativa de desempenho da edificação, os arquivos TMYx-Ap e TMYx indicaram um consumo energético muito superior da edificação. Ressalta-se, portanto, que tal impacto pode estar associado à radiação proveniente da base ERA5, uma vez que a base ISD é alimentada por dados de estações meteorológicas do INMET. Deste modo, o uso de diferentes arquivos climáticos afeta a classificação final de eficiência energética segundo a INI-R.

## Conclusões

O uso de diferentes arquivos climáticos impacta o desempenho da edificação e como a classificação segundo a INI-R é baseada no desempenho, diferentes arquivos climáticos podem impactar em diferentes níveis de eficiência para um mesmo modelo. A partir da avaliação de um modelo de habitação unifamiliar para a cidade de Viçosa-MG, buscou-se aferir este impacto na classificação da envoltória, a partir do uso de dos arquivos climáticos TMYx, TMYx-Ap, TMY, TMY3, TMY3n e INMET.

A partir da análise dos critérios de TO máxima a mínima, PHFT e CgTT, a envoltória recebeu nível A para os arquivos gerados somente com dados de estações do INMET e nível B para os arquivos que utilizam dados de

radiação da base ERA5. Para os critérios de TO, todos os formatos são elegíveis à classe A. Na avaliação do PHFT, todos os modelos são também elegíveis à classe A, sendo o formato TMYx com a maior variação e o TMY3 com a menor variação. O último critério, que avaliou a CgTT apresentou as maiores diferenças entre os formatos, e ainda que a média de redução seja superior a 50%, os modelos simulados com os arquivos TMYx e TMYx-Ap necessitavam de redução superior a 55% para obtenção da classe A.

A partir dos resultados obtidos, concluiu-se que para as configurações adotadas no modelo real, os arquivos que utilizam apenas dados do INMET obtiveram nível A. Além disso, tais modelos obtiveram menores valores de CgTT e maiores níveis de PHFT. Em contrapartida, os modelos que utilizaram os arquivos TMYx e TMYx-Ap obtiveram menores níveis de PHFT e maiores níveis de CgTT. Dado que a base ISD é alimentada pelos dados das estações do INMET, supõe-se que tais diferenças sejam decorrentes dos valores de radiação provenientes da base ERA5. Ressalta-se que os dados utilizados nos arquivos TMYx e TMYx-Ap apresentaram valores de radiação global superiores à radiação extraterrestre horizontal. Recomenda-se, portanto, uma maior investigação das bases de dados que compõe os arquivos climáticos utilizados, especialmente no que se refere aos dados de radiação. Deste modo, espera-se que trabalhos futuros sejam capazes de atestar a confiabilidade de formatos específicos, a partir de bases de dados já validadas.

## Agradecimentos

O presente trabalho é realizado com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

## Referências

- ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2021). NBR 15575: Edificações habitacionais - Desempenho.
- Bhandari, M., Shrestha, S. & New, J. (2012). Evaluation of weather datasets for building energy simulation. *Energy and Buildings*, 49, 109–118. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.01.033>
- Carlo, J. & Lamberts, R. (2008). Development of envelope efficiency labels for commercial buildings: Effect of different variables on electricity consumption. *Energy and Buildings*, 40(11), 2002–2008. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.05.002>
- Crawley, D. B. (1998). Which weather data should you use for energy simulations of commercial buildings? *ASHRAE Transactions*, 104(2), 498–515.
- Guimarães, Í. B. (2016). Análises de incertezas e sensibilidade de arquivos climáticos e seus impactos em simulações computacionais termo energéticas. Universidade Federal de Viçosa.
- INMETRO. (2022). PORTARIA No 309: Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (INI-R).
- Lawrie, L. K. & Crawley, D. B. (2019). Development of Global Typical Meteorological Years (TMYx).
- Melo, A. P., Fossati, M., Versage, R. S., Sorgato, M. J., Scalco, V. A. & Lamberts, R. (2016). Development and analysis of a metamodel to represent the thermal behavior of naturally ventilated and artificially air-conditioned residential buildings. *Energy and Buildings*, 112, 209–221. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.12.021>
- Mendes, N., Lamberts, R., Westphal, F. S. & Neto, J. A. B. da C. (2005). Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil. *Ambiente Construído*, 47–68.
- Triana, M. A., Lamberts, R. & Sassi, P. (2015). Characterisation of representative building typologies for social housing projects in Brazil and its energy performance. *Energy Policy*, 87, 524–541. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.08.041>

## Impacto do envelhecimento natural de telha cerâmica fria sobre o consumo energético de uma edificação

Ana Carolina Hidalgo-Araujo<sup>1</sup>, Lorena Santos Couto Bezerra<sup>1</sup>, Kelen Almeida Dornelles<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Arquitetura e Urbanismo, IAU-USP, São Carlos, Brasil

### Resumo

A utilização de materiais com altas refletância solar e emitância térmica nas superfícies urbanas é uma estratégia conhecida e eficaz para mitigar a absorção indesejada de radiação solar por parte das edificações. No entanto, a ação das intempéries sobre estas superfícies altera suas propriedades refletivas iniciais, diminuindo sua eficiência termoenergética. Este artigo apresenta o impacto do envelhecimento natural de uma telha fria sobre o gasto energético despendido com climatização artificial para uma edificação modelo localizada na cidade de São Carlos-SP. Após 36 meses de exposição ao tempo, verificou-se, através de simulação computacional (*EnergyPlus*), que o consumo energético anual total da edificação aumentou em 54,82% em decorrência da diminuição da capacidade refletiva da telha adotada.

### Introdução

Em regiões tropicais, a absorção da radiação solar pelas edificações pode acarretar em alto gasto energético despendido com climatização artificial, a fim de se minimizar o desconforto térmico por calor no interior dos ambientes. Uma estratégia passiva e efetiva para se reduzir este efeito é a utilização de revestimentos refletivos no envelope construtivo. Estes são definidos a partir de duas características referentes às suas superfícies: a emitância térmica e a refletância solar. De forma conjunta, ambas formam parte das propriedades ópticas dos materiais.

O material refletivo, ou “frio”, é caracterizado por possuir altas emitância térmica e refletância solar. A primeira refere-se à facilidade que um material tem em emitir energia em onda longa. Já a segunda se refere à parcela refletida em relação à radiação solar total incidente sobre uma superfície.

Dentre os elementos construtivos que compõem a envoltória de uma edificação, as coberturas são aquelas mais expostas à insolação. Desta forma, principalmente para construções de poucos pavimentos, localizadas em baixas latitudes, os telhados podem ser considerados um dos maiores responsáveis pela transferência de energia térmica para o interior das edificações (PEREIRA, 2014). Neste sentido, os benefícios da utilização das coberturas refletivas a fim de se reduzir os gastos energéticos com climatização artificial, principalmente em regiões de clima quente, já foram intensamente pesquisados e

comprovados (AKBARI; ROSE, 2001; POMERANTZ, *et al.*, 1999; ROSENFELD, *et al.*, 1998; TAHA, 2001; TAHA, 2002).

No entanto, as propriedades ópticas que caracterizam os materiais refletivos podem se alterar ao longo do tempo em decorrência da degradação pela exposição ao intemperismo natural. Com isso, um material inicialmente “frio” pode perder sua capacidade refletiva (ALCHAPAR; CORREA; 2016). Especificamente em relação às coberturas, a exposição ao tempo pode ter um efeito ainda mais significativo em relação às demais faces da edificação, pois além da degradação pela incidência de raios ultravioleta, estas também estão mais expostas ao acúmulo de material particulado em decorrência de sua angulação mais horizontalizada em relação às paredes. Com isso, um efeito inverso ao desejado pode ser gerado, agravando o desconforto térmico por calor, e, conseqüentemente, aumentando o consumo energético com climatização artificial.

Nos centros urbanos, a deposição de material particulado, decorrente da poluição, e as altas temperaturas decorrentes das ilhas de calor, são alguns dos fatores que mais contribuem para a degradação das superfícies edificadas. Os períodos em que há maior alteração nas propriedades ópticas, principalmente em relação às coberturas, coincide com os meses mais secos, já que há menor incidência da água pluvial sobre estas superfícies, impedindo a limpeza natural da poeira depositada sobre elas (CHENG *et al.*, 2012; ALGARNI; NUTTER, 2015; DORNELLES *et al.*, 2015). Sendo assim, apesar da recomendação por parte dos pesquisadores do uso de coberturas “frias” para regiões tropicais, a fim de reduzir os gastos energéticos despendidos com climatização artificial, a degradação natural destas telhas acaba diminuindo seus benefícios a longo prazo, principalmente em climas quentes e secos (ALGARNI; NUTTER, 2015).

A análise da vida útil das coberturas “frias”, que aborda especificamente os impactos do envelhecimento natural sobre os valores de refletância solar dos materiais, foi recentemente adicionada na norma de desempenho brasileira, a NBR 15575-1 (ABNT, 2021). Além desta norma, há também outros documentos que recomendam e citam a importância de se conhecer e controlar os valores das refletâncias solares do envelope construtivo (Selo Procel Edificações e RTQ-R). Porém, nenhum deles aborda os impactos do intemperismo natural e a conseqüente alteração das propriedades ópticas das

superfícies urbanas ao longo do tempo. Este fato demonstra o quanto o cenário nacional está atrasado em relação às discussões internacionais, principalmente os EUA e a Europa, os quais já possuem normas e manuais consolidados e de referência discutindo este tema.

Neste contexto, este trabalho apresenta a alteração da refletância solar de uma telha cerâmica “fria”, após 36 meses de exposição ao tempo. A partir destes dados, coletados em laboratório e em campo, foi possível analisar os impactos do envelhecimento natural de uma telha inicialmente refletiva sobre o desempenho termoenergético de uma edificação, ao longo de um ano. Através da simulação computacional utilizando-se o software *EnergyPlus*, mensurou-se o quanto a degradação natural desta telha impactou no consumo energético despendido especificamente com climatização artificial, acionada a fim de se reduzir o desconforto térmico por calor no interior da edificação analisada.

### Exposição ao tempo

A telha refletiva analisada neste artigo foi exposta em uma estação de envelhecimento (Figura 1) desenvolvida por Araujo e Dornelles (2022), de julho de 2019 a julho de 2022. Como diferenciais desta estação, destaca-se sua capacidade de monitoramento constante das temperaturas superficiais das amostras, ao longo de todo o período de exposição, além de sua independência energética para coletar todos os dados apurados. Segundo as autoras, este equipamento apresentou resultados bastante confiáveis para a avaliação do efeito da degradação natural sobre a refletância solar inicial das amostras expostas na estação.

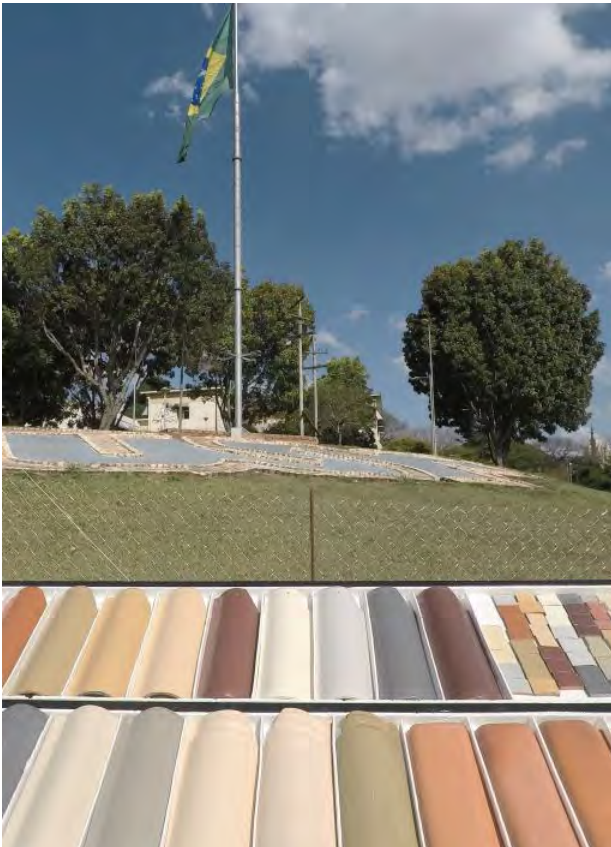


Figura 1: Estação de envelhecimento (ARAUJO, 2022).

### Medição da refletância solar

Para as medições de refletância solar utilizou-se o refletômetro portátil, modelo SSR-ER, versão 6.4 (*Devices and Services Company*, Dallas), pertencente ao Laboratório de Microestrutura e Ecoeficiência de Materiais (LME), da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Assim como nas pesquisas de Shirakawa *et al.* (2020, 2022), esta aferição foi realizada seguindo o método descrito na ASTM C1549-16 (ASTM, 2016). Conforme apresentado por Shirakawa *et al.* (2020), as medições utilizando o refletômetro portátil apresentam resultados tão confiáveis quanto os dados obtidos utilizando-se o espectrofotômetro com esfera integradora.

### Simulação

Conforme comentado anteriormente, a aquisição dos dados relativos à refletância solar da telha refletiva (cerâmica esmaltada na cor branca) foi obtida a partir do estudo realizado por Araujo (2022). Para a simulação computacional no software *EnergyPlus*, a metodologia foi dividida em 3 etapas: 1) modelagem 3D e inserção dos dados de entrada (*inputs*); 2) simulação no *EnergyPlus*; 3) tratamento dos arquivos de saída (*outputs*) e análise dos dados.

### Etapa 1

A residência modelada (Figura 2, Tabela 1) possui dois dormitórios(Q), um banheiro (WC), e uma sala e cozinha integradas (S/C); está localizada na cidade de São Carlos, SP. O clima possui um período mais chuvoso, com menores amplitudes térmicas, e um período mais seco, com maiores amplitudes térmicas (EMBRAPA, 2022). Os dados relativos ao arquivo climático utilizado, referente à cidade de São Carlos, estão descritos na Tabela 2.

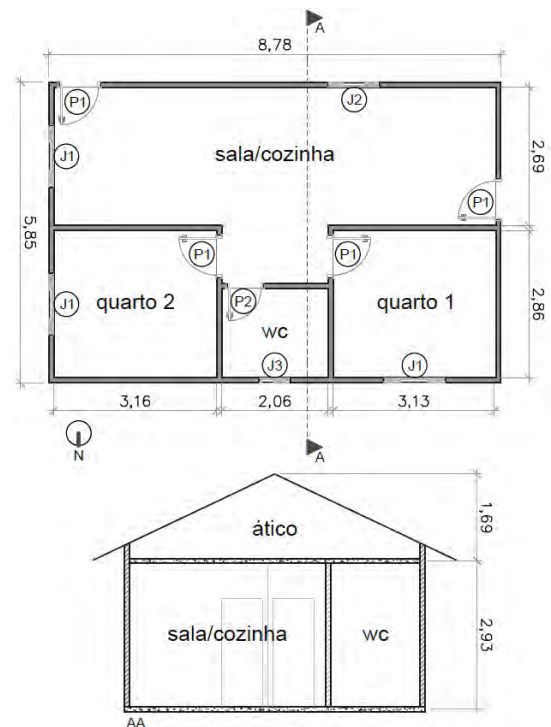


Figura 2: Planta utilizada para modelagem tridimensional, adaptado de ROSSI (2016).

Tabela 1: Esquadrias utilizadas para modelagem tridimensional, adaptado de ROSSI, 2016.

Aberturas	Dimensões (L x A x P)
<b>Portas</b>	<b>P1:</b> 0,8 x 2,1 m <b>P2:</b> 0,7 x 2,1 m
<b>Janelas</b>	<b>J1:</b> 1,2 x 1,0 x 1,1 m <b>J2:</b> 1,0 x 1,0 x 1,1 m <b>J3:</b> 0,6 x 0,6 x 1,5 m

Tabela 2: Dados referentes ao arquivo climático utilizado (EPW).

Variável climática	Média anual
<b>Irradiação global horizontal</b>	193,8912 Wh/m <sup>2</sup>
<b>T bulbo seco média</b>	20,287 °C
<b>T bulbo seco máxima</b>	34,6 °C
<b>T bulbo seco mínima</b>	4,9 °C
<b>Umidade relativa</b>	70,8301 %
<b>Temperatura do solo (°C)</b>	Jan: 22,66; Fev: 22,21; Mar: 21,33; Abr: 20,51; Mai: 18,96; Jun: 18,14; Jul: 17,93; Ago: 18,35; Set: 19,32; Out: 20,52; Nov: 21,69; Dez: 22,46.

Primeiramente, a volumetria da edificação foi modelada no software *Sketchup*, no qual foram inseridos os dados de entrada referentes à: planta e divisão de zonas térmicas; orientação (N); e, aberturas e definição dos elementos opacos e transparentes. Posteriormente, o *plug-in Euclid* foi utilizado para associar as informações do modelo tridimensional do *Sketchup* com o software de simulação termoenergética *EnergyPlus*, e inserir o arquivo relativo aos dados climáticos (EPW) da cidade de São Carlos, SP. Com isso, um arquivo dentro do *EnergyPlus* foi criado (IDF), no qual foram inseridos os demais dados de entrada necessários para a realização da simulação computacional relativa a um ano de consumo energético. A seguir, apresentam-se na Tabela 3 todos os dados de entrada definidos para a realização da simulação, e, na Figura 3 e Tabela 4, as propriedades físicas dos materiais escolhidos para comporem a edificação modelo adotada.

Tabela 3: Inputs para simulação computacional.

Inputs	Parâmetros
<b>Zonas térmicas</b>	5 zonas: Q 1; Q 2; WC; S/C; ático
<b>Implantação</b>	N conforme Figura 2, São Carlos, SP
<b>Aberturas</b>	Janelas com vidro com e = 4mm
<b>Estrutura</b>	Paredes cerâmicas revestidas com argamassa interna e externa; Piso: concreto maciço 10 cm; Laje: lajota concreto e cerâmica revestida com argamassa; Cobertura: telha refletiva
<b>Prop. físicas</b>	Figura 3 e Tabela 4
<b>Uso/ocupação</b>	Iluminação (Q): ON das 6h-8h e das 22h-24h.; Iluminação (S/C): ON das 16h-22h; Equipamentos (S/C): ON das 14h-22h; Pessoas dormindo (Q): 2 pessoas das 22h-8h; Pessoas sentadas (S/C): 1 pessoa das 14h-18h e 2 pessoas das 18h-22h.

<b>Ar-condicionado</b>	AC apenas nos quartos: Liga das 24h-7h quando Tar>25°C ou Tar<18°C.
<b>Refletância telha</b>	$\rho$ inicial (0): 0,83; $\rho$ final (36): 0,57
<b>Outputs</b>	Site Outdoor Air Drybulb Temperature; Zone Operative Temperature; Zone Ventilation Air Change Rate; Zone Ideal Loads Zone Total Cooling Rate; Zone Ideal Loads Zone Total Heating Rate; Zone Lights Electric Power; Electric Equipment Electric Power; Zone Mean Air Temperature.

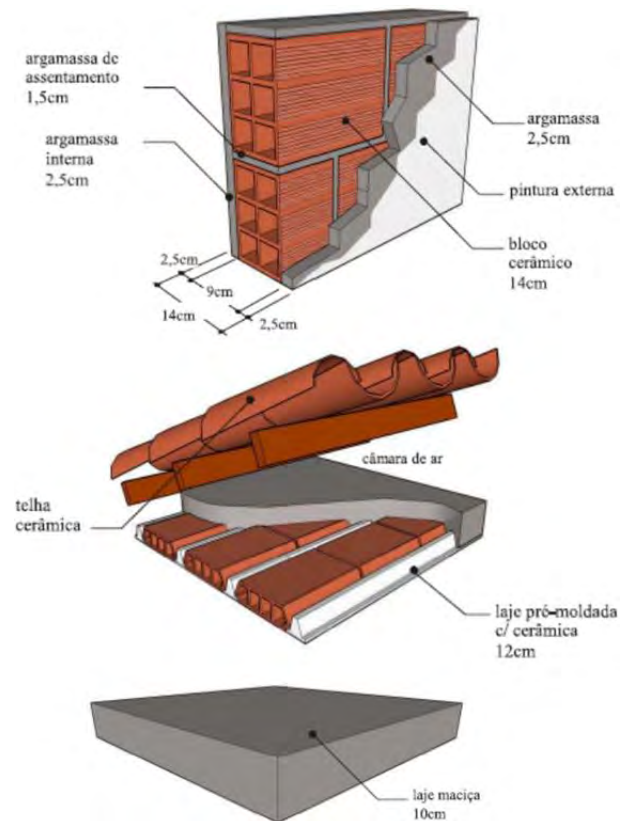


Figura 3: Esquema gráfico do sistema construtivo das paredes, cobertura e laje adotados (INMETRO, 2013).

Tabela 4: Propriedades físicas do sistema construtivo.

Inputs	ESPESSURA	CONDUTIVIDADE	DENSIDADE	CALOR ESP.	REFLETÂNCIA
	(mm)	(W/m-K)	(Kg/m <sup>3</sup> )	(J/Kg-K)	$\rho$
Concreto	100	1,75	2200	1000	0,2
Argamas. parede interna e externa	2,5	1,15	2000	1000	Ext: 0,4 Int: 0,84
Bloco cerâmico	2,0	0,9	1400	920	-
Argamas. lajota	0,5	1,15	2000	1000	-
Concreto lajota	2,0	1,75	2200	1000	-
Cerâmica lajota	2,0	0,9	1400	920	-

Telha refletiva 0 meses	2,0	0,9	1400	920	0,83
Telha refletiva 36 meses	2,0	0,9	1400	920	0,57
Madeira	3,5	0,29	700	1340	-

### Etapa 2

A etapa 2 se refere ao ensaio realizado no software *EnergyPlus*. A simulação foi feita para dois cenários distintos, alterando-se apenas 1 variável: a refletância solar da telha “fria” analisada. Primeiro, foi simulado o consumo energético anual da edificação base utilizando-se o valor da refletância solar da telha nova, ( $\rho_0 = 0,83$ ); em seguida, o mesmo processo foi repetido substituindo apenas o valor da refletância solar ( $\rho_{36} = 0,57$ ).

Em ambos os casos se considerou um valor de refletância constante ao longo do ano simulado. A partir destes dois modelos simplificados, foram gerados os arquivos com todos os dados de saída de ambas as simulações. Estes foram exportados para o Excel e organizados de forma a transformar os dados quantitativos em qualitativos.

### Etapa 3

A última etapa se refere à sistematização dos dados obtidos a partir da simulação. Estes valores numéricos foram transformados em gráficos com o intuito de analisar de que forma a alteração da variável em questão (refletância solar) impacta no desempenho energético da edificação. As comparações realizadas neste trabalho se referem ao comportamento diário relativo às temperaturas do ar interno e externo (para os solstícios de verão e inverno e equinócio), e a variação no consumo energético entre as duas situações analisadas (KWh/ano).

### Discussão e análise dos resultados

Como o foco deste artigo é a análise do impacto do envelhecimento natural de uma telha refletiva sobre o consumo energético despendido com climatização artificial, os dados obtidos através da simulação computacional foram analisados apenas para os ambientes dotados de ar-condicionado (quartos 1 e 2).

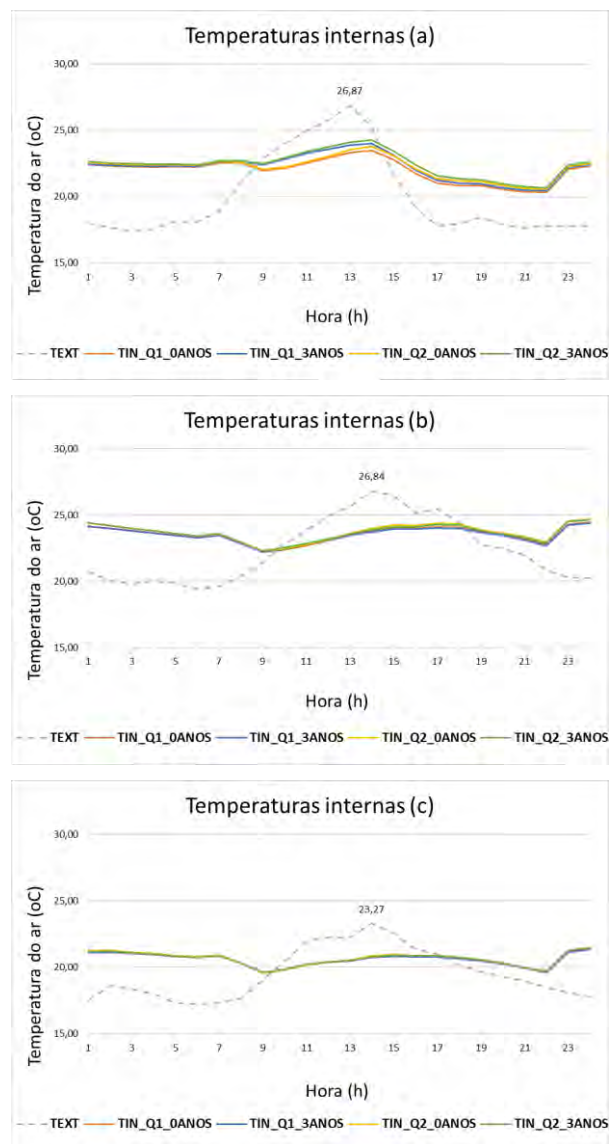
A primeira observação diz respeito ao comportamento diário relativo às temperaturas do ar, interna e externa. Para esta análise foram selecionados 3 dias específicos ao longo do ano: solstício de verão (Gráfico 1a), equinócio (Gráfico 1b) e solstício de inverno (Gráfico 1c).

O gráfico relativo ao solstício de verão apresenta as curvas que mais destacam o efeito da diminuição da refletância da telha “fria” em relação às temperaturas internas dos dormitórios (Q1 e Q2). Comparando-se as curvas do Gráfico 1(a), percebe-se que para ambos os quartos, a temperatura interna após os 36 meses de intemperismo aumentou 0,76 °C. Além da diminuição da refletividade da telha analisada, esta alteração pode ser explicada pelo comportamento da temperatura ( $T_{ar}$ ) externa durante o verão, que atinge um pico muito evidente no gráfico, diferentemente do que ocorre no

equinócio e no inverno (1b e 1c). Com isso, após atraso térmico, a  $T_{ar_{interna}}$  dos cômodos durante o verão também apresenta picos no gráfico analisado.

No equinócio, a  $T_{ar_{interna}}$  dos quartos não apresenta uma diferença significativa em relação aos impactos da degradação natural da telha refletiva, apresentando uma diferença de  $T_{ar_{interna}}$  para ambos estágios de envelhecimento, e para ambos dormitórios, de em média 0,02 °C. A mesma lógica se aplica ao analisarmos a  $T_{ar_{interna}}$  dos quartos durante o inverno, o qual possui a mesma diferença média entre as  $T_{ar_{interna}}$  em relação ao equinócio (0,02 °C) e, apresenta menor temperatura máxima do ar externo em relação aos 3 dias analisados.

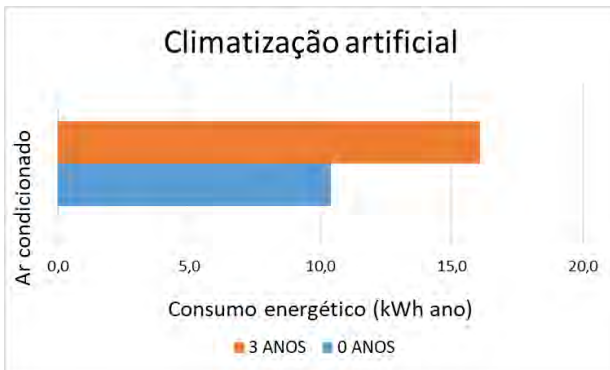
Gráfico 1: Temperaturas internas dos quartos 1 e 2 para o solstício de verão (a), equinócio (b) e solstício de inverno (c) para a telha refletiva nova (0 anos) e envelhecida (3 anos).



A segunda análise pode ser entendida como uma consequência das curvas apresentadas no Gráfico 1, afinal, se há aumento na temperatura interna dos cômodos, também haverá maior necessidade da utilização de climatização artificial para se manter condições de

conforto térmico adequado dentro dos dormitórios. Esta análise se apresenta como o resultado mais relevante deste artigo, já que a partir dela pode-se verificar que de fato há um impacto importante do envelhecimento natural, de uma telha inicialmente refletiva, sobre o consumo energético anual despendido com climatização artificial para uma edificação unifamiliar padrão (Gráfico 2).

*Gráfico 2: Variação no consumo de energia elétrica com ar-condicionado decorrente da diminuição da refletância solar da telha “fria” adotada.*



Conforme demonstrado na Tabela 5, o gasto energético despendido com iluminação e equipamentos elétricos se manteve constante para as situações inicial (0 meses de envelhecimento) e final (36 meses de envelhecimento) pois seus consumos e padrões de uso independem da sujidade da telha refletiva analisada. A única alteração relativa ao consumo de energia ocorreu nos quartos, afinal, conforme citado anteriormente, ambos possuem ar-condicionado. Desta forma, é possível analisar isoladamente o impacto da diminuição da refletância solar da telha fria adotada, sobre as temperaturas internas dos cômodos (Gráfico 1) e, conseqüentemente, o aumento da necessidade do funcionamento da climatização artificial durante o período especificado.

*Tabela 5: Variação no consumo de energia elétrica total decorrente da diminuição da refletância solar da telha “fria”.*

Situação	Iluminação	E. Elétricos	Q 1	Q 2
	kWh/ano			
Inicial $\rho = 0,83$	445	350,4	5,1	5,31
Final $\rho = 0,57$	445	350,4	7,92	8,16

Percebe-se que houve um aumento bastante significativo no consumo de ar-condicionado para ambos os quartos, em decorrência da diminuição da refletância solar da telha cerâmica esmaltada branca. Para ambos estágios analisados, o quarto 2 (Q2) apresentou demanda levemente superior de climatização artificial em comparação ao quarto 1 (Q1). Essa diferença de consumo pode estar relacionada ao posicionamento do Q2, o qual possui uma abertura voltada à Leste, recebendo maior incidência de radiação solar no período da manhã; enquanto a abertura do Q1 está voltada à Norte, a qual não recebe radiação de forma tão intensa, como ocorre nos eixos Leste-Oeste. Outro fator que pode influenciar essa diferença de consumo é o fato de que a janela do Q1 é sombreada pelo beiral existente no modelo adotado, o que

também reduz as cargas térmicas no interior deste cômodo.

Além da diminuição da capacidade refletiva da telha fria durante a noite, período programado para o funcionamento do ar-condicionado, os dormitórios estão sob o efeito do atraso térmico, além da emissão de calor por parte das pessoas dormindo. Estes fatores também contribuem para que a  $T_{ar\text{interno}}$  dos quartos seja maior que a  $T_{ar\text{externo}}$ . Com isso, a utilização da climatização artificial se faz necessária, a fim de se manter uma temperatura confortável (entre 18 °C e 25 °C) no interior dos quartos durante toda a noite.

Em termos percentuais, o aumento no gasto energético com ar condicionado, para ambos os quartos, é parecido. O Q1 apresentou aumento de 56,21% e o Q2 de 53,67%. No montante total, essas porcentagens individuais representam um aumento no consumo energético de 54,82%. Isto demonstra que o impacto da degradação da telha refletiva sobre o consumo energético específico com ar-condicionado teve um efeito homogêneo em ambos dormitórios.

### Conclusão

Conforme discutido anteriormente, a utilização de coberturas “frias” para se controlar os ganhos térmicos de edificações localizadas em clima quente é uma estratégia de projeto bastante conhecida, validada e estudada há muitos anos. Porém, o envelhecimento natural desses revestimentos, decorrente da deposição de material particulado sobre suas superfícies, pode alterar suas propriedades ópticas iniciais, afetando sua capacidade refletiva ao longo do tempo. Neste trabalho, a refletância solar de uma telha cerâmica esmaltada branca, nova e envelhecida após 36 meses de exposição natural, foi isolada como variável de comparação, a fim de se compreender os impactos do intemperismo sobre o consumo de energia anual com climatização artificial de uma edificação térrea, localizada na cidade de São Carlos, SP. Os principais efeitos observados foram:

1) o solstício de verão foi o período do ano que sofreu maior impacto em relação à degradação natural da telha adotada, apresentando aumento na temperatura interna dos quartos de 0,76 °C em relação à situação sem envelhecimento;

2) na simulação utilizando os dados de 36 meses de exposição ao tempo, foi possível observar um aumento de 54,82% no consumo energético anual total despendido com climatização artificial nos dois quartos analisados. A partir destas análises, conclui-se que há uma correlação relevante entre a degradação natural dos materiais inicialmente refletivos e os gastos energéticos despendidos com climatização artificial ao longo do tempo, principalmente para climas quente e seco. Desta forma, para que as características ópticas iniciais das telhas “frias” se mantenham eficientes durante suas vidas úteis, recomenda-se que manutenções e limpezas periódicas sejam realizadas nestas superfícies a fim de aumentar a sua eficiência à longo prazo.

## Agradecimentos

À CAPES pela bolsa concedida; aos funcionários do Instituto de Arquitetura e Urbanismo (IAU-USP) pelo suporte técnico necessário para a realização da pesquisa; e ao pesquisador Lucas Nascimento de Lima (LME, POLI-USP) pelas medições de refletância solar da telha analisada.

## Referências

- ABNT. **NBR 15575**: Edificações habitacionais - Desempenho. Rio de Janeiro. 2021.
- AKBARI, H.; ROSE, L. S. Characterizing the fabric of the urban environment: a case study of metropolitan Chicago, Illinois. LBNL- 49275. ed. Berkeley, CA: **Lawrence Berkeley National Laboratory Report**, 2001
- ALCHAPAR, N. L.; CORREA, E. N. Aging of Roof Coatings: solar reflectance stability according to their morphological characteristics. **Construction and Building Materials**, v. 102, p. 297–305, 2016.
- ALGARNI, S.; NUTTER, D. Influence of dust accumulation on building roof thermal performance and radiant heat gain in hot-dry climates. **Energy and Buildings**, v. 104, p. 181-190, 2015.
- ARAUJO, A. C. H. **Absortância solar e o envelhecimento natural de telhas expostas ao tempo**. 2022. Dissertação - IAU, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022. DOI: <https://doi.org/10.11606/D.102.2022.tde-06062022-143613>.
- ARAUJO, A. C. H.; DORNELLES, K. A. Estação de envelhecimento natural para análise de degradação da absortância de telhas e monitoramento de temperaturas superficiais. **Ambiente Construído [online]**. v. 22, n. 2 pp. 247-267, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212022000200603>.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1549-16** - Standard test method for determination of solar reflectance near ambient temperature using a portable solar reflectometer. American Society for Testing and Materials. [S.l.]. 2016.
- CHENG, M.-D.; MILLER, W.; NEW, J.; BERDAHL, P. Understanding the long-term effects of environmental exposure on roof reflectance in California. **Construction and Building Materials**, v. 26, p. 516-526, 2012.
- DORNELLES, K.; CARAM, R.; SICHIERI, E. Natural weathering of cool coatings and its effect on solar reflectance of roof surfaces. **Energy Procedia**, v. 78, p. 1587-1592, 2015.
- EMBRAPA. **Estação da Embrapa Pecuária Sudeste**. Disponível em: <http://www.cppse.embrapa.br/meteorologia/index.php?pg=inicio>>. Acesso em: 10 nov. 2022.
- INMETRO. **Comitê Brasileiro de Iluminação (CIE Brasil)**. INMETRO, 2020. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/ciebrasil/origem.asp>. Acesso em 10 de nov. 2022.
- PEREIRA, C. D. **Influência da refletância e da emitância de superfícies externas no desempenho térmico de edificações**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, 2014
- POMERANTZ, M.; AKBARI, H.; KONOPACKI, S. J.; TAHA, H.; ROSENFELD, A. H. Reflective surfaces for cooler buildings and cities. **Philosophical Mag B**, v. 79, n. 9, p. 1457–1476, 1999.
- ROSENFELD, A. H.; AKBARI, H.; ROMM, J. J.; POMERANTZ, M. Cool communities: strategies for heat islands mitigation and smog reduction. **Energy and Buildings**, v. v.28, n. n.1, p. p.51–62, 1998.
- ROSSI, M. M. **Regression models to assess the thermal performance of Brazilian low-cost houses: consideration of natural ventilation**. 2016. Dissertação - IAU, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016. DOI: 10.11606/D.102.2016.tde-13102016-163056.
- SHIRAKAWA, M. A.; LIMA, L. N.; GAYLARDE, C. C.; SILVA JUNIOR, J. A.; LOZ, P. H.; JOHN, V. M. Effects of natural aging on the properties of a cool surface exposed in different Brazilian environments. **Energy and Buildings**, v. 221, p. 1-14, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110031>.
- SHIRAKAWA, M. A.; LIMA, L. N.; GAYLARDE, C.; FERNANDES -HACHICH, V.; SILVA JUNIOR, J. A.; JOHN, V. M. The influence of environment and carbonation of fiber cement tiles on the reflectance of a cool surface exposed in four Brazilian cities. **Energy & Buildings**, v. 254, p. 1-20, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111550>.
- TAHA, H. Meteorological and air quality impacts of increased urban surface albedo and vegetative cover in the Greater Toronto Area, Canada. LBNL- 49210. ed. Berkeley, CA: **Lawrence Berkeley National Laboratory Report**, 2002.
- TAHA, H. Potential impacts of climate change on tropospheric ozone in California: a preliminary episodic modeling assessment of the Los Angeles Basin and the Sacramento Valley. LBNL - 46695. ed. Berkeley, CA: **Lawrence Berkeley National Laboratory Report**, 2001.



## Desempenho térmico de argamassas produzidas com resíduos da mineração e siderurgia

Letícia Matias Martins<sup>1</sup>, Vítor Freitas Mendes<sup>1</sup>, Adriano Pinto Gomes<sup>1</sup>, Júlia Castro Mendes<sup>1</sup>  
 Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil<sup>1</sup>

### Resumo

Este estudo visa fazer uma análise do desempenho térmico de uma edificação com argamassas de revestimento produzidas com os resíduos da mineração e siderurgia. A avaliação foi realizada via simulação computacional, no *EnergyPlus*, considerando 3 climas bem distintos do Brasil. Foram usados como dados de entrada as propriedades termofísicas das argamassas, obtidas em estudos anteriores. Como resultado, as argamassas de resíduos obtiveram desempenho térmico superior à produzida com areia natural (de referência), tendo como destaque a argamassa com quartzito e adição de 5% de pó de escória. Isso ocorreu devido à alta capacidade térmica e baixa condutividade térmica desse material. Assim, essas argamassas são alternativas promissoras para melhorar o desempenho térmico das edificações brasileiras.

### Introdução

A envoltória das edificações influencia no seu desempenho térmico e eficiência energética, o que, por sua vez, afetará o conforto dos usuários ou levará a necessidade de aquecimento e resfriamento artificial do ambiente interno durante toda a sua vida útil (Passos, Caraseck, & Amaral, 2016). As principais propriedades da argamassa, que podem ser usadas como revestimento das envoltórias e influenciam no desempenho térmico da edificação, são a espessura, o calor específico e a condutividade térmica (Mendes, Fardin, Barreto, Caetano, & Mendes, 2022).

A crescente produção de resíduos pelos setores da mineração e siderurgia e a sua disposição inadequada resultam em sérias consequências econômicas, ambientais e sociais. Além disso, o setor da construção civil é responsável por uma elevada extração de recursos naturais, como a areia natural. De acordo com o Plano Nacional de Mineração 2030 (2021), considerando o crescimento em infraestrutura, habitação e saneamento a uma taxa anual de 5,6%, em 2030 o Brasil consumirá 857 milhões de toneladas. A extração desse recurso natural causa erosão no solo, retirada da vegetação local e aumento do assoreamento e turbidez dos cursos d'água (Nogueira, 2016).

Ao mesmo tempo, o setor da construção civil se apresenta como uma potencial solução, devido a sua grande capacidade de incorporação de resíduos na produção de

materiais de construção civil. Por isso, nos últimos anos, em todo o mundo, diversos resíduos industriais vêm sendo investigados para emprego na construção civil, tais como o Quartzito Friável (QF) e o Pó de Escória de Aciaria (PEA) (Martins, et al., 2021; Martins, Peixoto, & Mendes, 2023), apresentados na Figura 1.

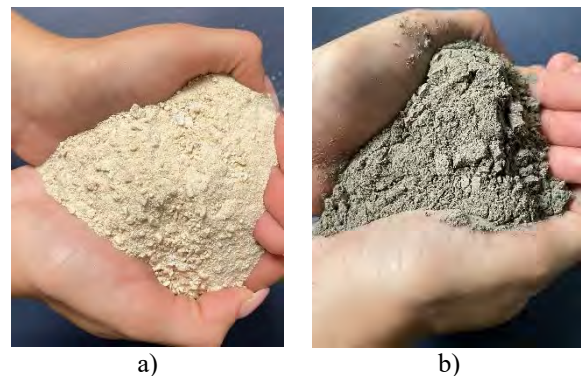


Figura 1: Amostras dos materiais: a) Quartzito Friável e b) Pó de Escória de Aciaria. Fonte: os autores (2022).

O Quartzito Friável (QF) surge da extração do quartzito, uma rocha ornamental, popularmente conhecida como “Pedra São Thomé”. Esse material corresponde ao material intemperizado na camada superior da jazida que não é própria para comercialização (Santos, 2015). O QF é constantemente depositado a céu aberto (Reis F. M., 2019), ocasionando degradação visual, assoreamento de rios e poluição do ar (Collares, Jr., I, & Motta, 2012; Reis, Collares, G., & Reis, 2017). Entretanto, diversas pesquisas indicam o elevado potencial de empregabilidade desse resíduo na substituição da areia de rio em matrizes cimentícias (Santos, 2015; Dias, 2017; Mendes J. C., et al., 2020). Na Figura 2 ilustra-se o QF em um depósito a céu aberto em Minas Gerais.



Figura 2: Depósito de quartzito a céu aberto na Serra da Canastra (MG). Fonte: (ICMBIO, 2019), reproduzida com autorização.

A escória de aciaria é outro resíduo que frequentemente vêm sendo depositado em pátios a céu aberto. Esse material pode ser aproveitado como agregado graúdo e miúdo em matrizes cimentícias (Andrade, et al., 2021; Costa, et al., 2022), e além disso pode ser incorporado na matriz na forma de pó (<0,075mm) funcionando como material cimentício suplementar (Shi, Chen, Wang, & Feng, 2015). O Pó de Escória de Aciaria (PEA) surge do processo de beneficiamento e reciclagem desse resíduo para ser utilizado como agregado. A Figura 3 ilustra um depósito a céu aberto de escória.



Figura 3: Depósito de escória a céu aberto próxima ao Rio Paraíba em Volta Redonda, estado do Rio de Janeiro. Fonte: (LUCENA, 2022), reproduzida com autorização.

Contudo, mesmo tendo estudos que demonstram, sob o aspecto técnico, um grande potencial de aplicabilidade desses resíduos no setor da construção, ainda há uma lacuna de pesquisas sobre o desempenho térmico desses dois resíduos de forma combinada quando incorporados a materiais de construção. Assim, o presente trabalho analisou o desempenho térmico de argamassas de revestimento produzidas com QF e PEA, em comparação com argamassas de referência (REF) produzida com agregado natural. A argamassa com resíduos proposta neste trabalho é uma alternativa de revestimento que, além de ser avaliada termicamente neste trabalho, pode proporcionar uma destinação ambientalmente adequada para os resíduos.

## Experimento

Este trabalho investigou, por meio de simulações energéticas, o desempenho térmico de uma edificação de interesse social, na qual se utilizou argamassas de revestimento produzidas com resíduos QF e QF+PEA, em comparação com a argamassa produzida com agregados naturais (REF). As simulações foram feitas com o *software EnergyPlus* (v8.9) para um período de um ano de referência. Foram consideradas cidades representativas de climas quente, frio e ameno. A cidade de São Joaquim (SC), é conhecida pelo seu clima extremamente frio comparando às outras cidades do país, por sua vez a cidade Corumbá (MS) é notoriamente quente. Já São Paulo (SP) encontra-se com uma temperatura ao longo do ano relativamente amena.

## Edificação de Estudo

O seguinte projeto foi pensado para populações de baixa renda, com uma área de 39,6 m<sup>2</sup>, a residência apresenta uma sala, dois quartos, cozinha e banheiro social. Na Figura 4 apresenta-se uma visão geral da residência em questão.

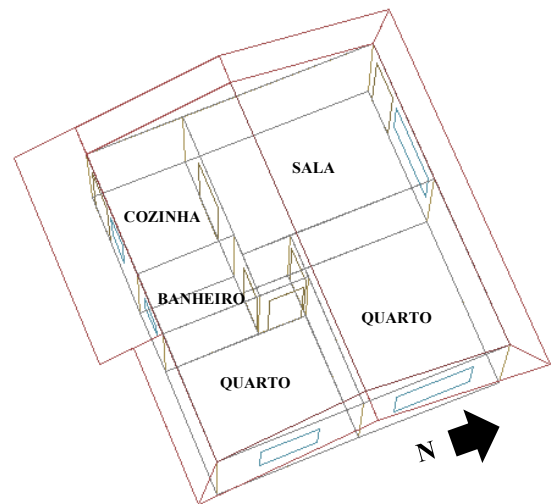


Figura 4: Residência simulada. Fonte: os autores (2022).

O sistema de fechamento vertical da edificação é composto por tijolo cerâmico com 0,09 m de espessura, com as seguintes propriedades:  $\lambda = 0,44$  W/m.K,  $c = 650$  J/kg.K e  $\rho = 1500$  kg/m<sup>3</sup>; revestido com argamassa, pintada com uma tinta comum (absortância térmica = 0,9 e absortância solar e visível = 0,5). A residência teve suas paredes internas e externas revestidas, em ambos os lados, com as argamassas simuladas, adotando-se uma espessura de 2cm em cada lado. As propriedades das argamassas (detalhadas na próxima seção) foram obtidas em um trabalho experimental realizado (Martins L. M., Argamassas isolantes térmicas para revestimento com resíduos da mineração e siderurgia, 2022). Para a modelagem da edificação no *EnergyPlus*, foram consideradas as propriedades termofísicas das argamassas e para os demais materiais construtivos (ex. madeiras e vidros), foram utilizadas as propriedades padrões do

programa. O padrão de ocupação, de iluminação e limites de temperatura operativa da edificação foram ajustados conforme a norma NBR 15575 (ABNT, 2021).

A análise do desempenho térmico das argamassas foi com base na comparação das demandas energéticas para acondicionar os ambientes de longa permanência (sala e quartos) de cada modelo simulado (ABNT, 2021). Ademais, considerando as 3 regiões e 4 tipos de argamassa, foram criados 12 modelos para simulação energética. Logicamente, aquele modelo que garante uma menor demanda energética é o mesmo que se mostra com o melhor desempenho térmico.

### Propriedades termofísicas das argamassas

As características termofísicas das argamassas simuladas foram obtidas em um estudo anterior de Martins (2022), no qual houve a substituição total do agregado miúdo convencional pelos resíduos investigados. Na Tabela 1 apresenta-se os valores de condutividade térmica ( $\lambda$ ), calor específico ( $c$ ) e densidade aparente ( $\rho$ ) das argamassas utilizadas como dados de entrada para a simulação computacional e análise do desempenho térmico das edificações. Além disso, apresenta-se os resultados de capacidade térmica (CT) e Transmitância Térmica (U) das paredes, considerando 2 cm de argamassa revestindo os dois lados de uma alvenaria de tijolos cerâmicos (propriedades apresentadas anteriormente).

Tabela 1: Propriedades termofísicas das argamassas

Argamassa	$\lambda$ - W/m.K	$c$ - J/kg.K	$\rho$ - kg/m <sup>3</sup>	CT - kJ/m <sup>2</sup> .K	U - W/m <sup>2</sup> .K
REF	0,66	623	1779	115	1,68
QTZ	0,58	748	1753	124	1,66
QTZ+5%PEA	0,29	854	1721	131	1,49
QTZ+10%PEA	0,36	802	1743	128	1,55

Fonte: adaptado de Martins (2022).

### Discussão e análise dos resultados

Na Figura 5 apresenta-se os resultados obtidos pós simulação do modelo com as 4 argamassas, em demanda energética anual. Já na Figura 6, os resultados são apresentados em porcentagem de economia na demanda energética. Em relação à Figura 7, são apresentadas essas economias em relação ao custo de utilização dos sistemas mecânicos de aclimação interna, tendo como base os valores das tarifas de energia das cidades simuladas (Enel, 2022; Celesc, 2022; Energisa, 2022).

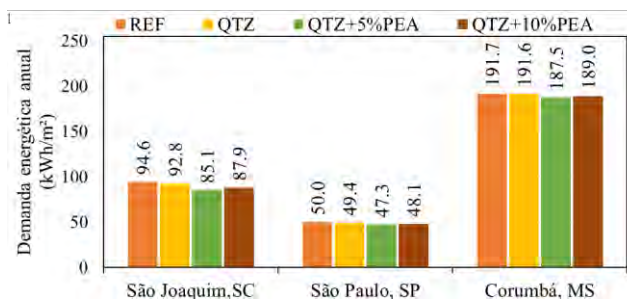


Figura 5: Demanda energética anual para os 4 tipos de argamassas

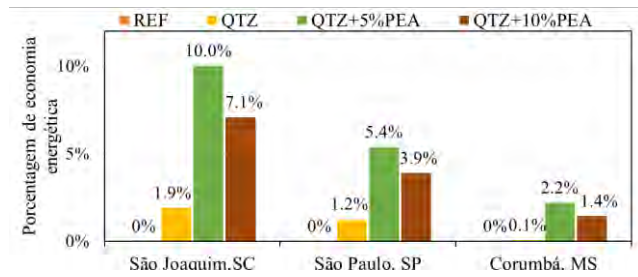


Figura 6: Porcentagem de economia na demanda energética para os 4 tipos de argamassas

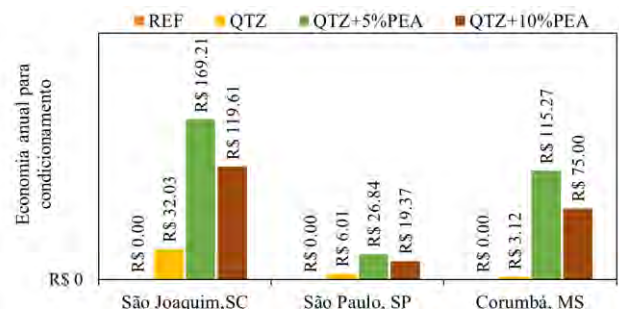


Figura 7: Economia no custo da demanda energética para os 4 tipos de argamassas

Inicialmente, nota-se, como era de se esperar, que os modelos localizados na cidade de São Paulo (clima relativamente mais ameno) são aqueles que demandam menos energia para aclimatar o ambiente. Isso, pois o clima ameno tende a propiciar um ambiente mais confortável ao longo do ano, em relação aos demais climas (Velo, Souza, & Koury, 2017). Logo, espera-se (e comprova-se na Figura 5) que as cidades de São Joaquim, SC (clima bastante frio) e Corumbá, MS (clima predominantemente quente) demandem mais energia para manter o ambiente em uma temperatura de conforto.

Além disso, nota-se uma maior efetividade das argamassas sustentáveis em São Joaquim (SC), já que, na Figura 6, essas atingiram valores de até 10% de economia, em relação à argamassa REF. Esse maior valor é referente à argamassa QTZ+5%PEA, a qual, segundo ilustra-se na Tabela 1, é a que tem menor condutividade térmica e maior calor específico, garantindo assim menor transmitância térmica e maior capacidade térmica, respectivamente. O motivo por trás desse resultado se deve ao fato de que as argamassas com baixa condutividade (que garantem menor transmitância térmica) isolam melhor o ambiente interno, impedindo com que o calor escape por entre as envoltórias da edificação. Por outro lado, o maior calor específico, proporciona à argamassa uma maior capacidade térmica. Isso faz com que o interior da edificação tenha uma menor amplitude térmica, favorecendo o seu desempenho térmico. Nesse sentido, vale ressaltar que, como verificado na Tabela 1, a densidade aparente do material não foi preponderante nos resultados de capacidade

térmica do mesmo. Logo, por mais que a argamassa QTZ+5%PEA tenha densidade inferior a algumas outras, ela ainda se destaca como a que proporciona a maior capacidade térmica (131 (kJ/m<sup>2</sup>.K)).

Além disso, essa argamassa também se destacou positivamente na cidade de Corumbá (MS). Isso pode ser explicado também a partir da baixa condutividade térmica e do alto calor específico (gerando uma menor transmitância térmica e uma maior capacidade térmica). Contudo, entende-se que, dessa vez, uma menor transmitância térmica faz com que o calor externo não adentre o interior da edificação, através das envoltórias da construção (Morales, Juarez, Muñoz, Mendivil, & Ruiz, 2014). Com relação à alta capacidade térmica, nota-se que, valores mais elevados deixam a edificação menos exposta à temperatura externa (Mendes J. C., Barreto, Castro, Brigolini, & Peixoto, 2020).

Por sua vez, a argamassa REF teve o pior desempenho térmico em todas as localidades simuladas, São Joaquim (SC), São Paulo (SP) e Corumbá (MS). Ela se trata de argamassa que tem a menor capacidade térmica (devido ao menor calor específico aferido) e a maior transmitância térmica (devido à maior condutividade térmica), conforme visto na Tabela 1. Entende-se que a edificação, com essas propriedades, não impede (tanto quanto as demais argamassas) nenhum tipo de fluxo de calor, i.e., a saída do calor, para manter o ambiente interno mais quente em São Joaquim (SC), e a entrada do calor, para manter o ambiente mais ameno em Corumbá (MS). Além disso, a argamassa REF não oferece vantagem (frente as demais), quanto a oscilações de temperatura interna da edificação, uma vez que as outras argamassas tem maior capacidade de manter o ambiente estável termicamente, devido a sua maior capacidade térmica (Mendes J. C., Barreto, Castro, Brigolini, & Peixoto, 2020).

Também cabe destacar um maior resultado de desempenho térmico na região fria (São Joaquim). Isso é um ponto relevante na análise, demonstrando que as argamassas de resíduos podem ser mais eficiente em climas similares à cidade de São Joaquim (cidades frias). De qualquer forma, as argamassas de resíduos demonstraram uma economia na demanda energética em todas as localidades simuladas. Mesmo a argamassa QTZ (argamassa com resíduo que proporcionou maior demanda energética para a edificação) garantiu uma melhor atuação na eficiência energética, frente a argamassa com areia de rio (REF). Isso é vantajoso tanto na economia energética durante a ocupação da edificação, quanto na economia ao se utilizar materiais com resíduos. Santos (2015) analisou o custo de produção de argamassas com resíduos de quartzito, apontando vantagens econômicas e ambientais. Econômicas, pois, o custo total para produção de argamassas de assentamento e revestimento utilizando o quartzito pode ser até 34% inferior às argamassas com areia de rio (Santos, 2015). Ambientais, pois, há redução da deposição de resíduos e diminuição da extração de agregados naturais.

O desempenho térmico da edificação com argamassas sustentáveis com propriedades térmicas melhoradas também foram alvo de estudo de Mendes *et al.* (2020),

Franco *et al.* (2019) e Barreto (2021). Os resultados obtidos pelos autores, quando analisaram argamassas de resíduos da mineração e siderurgia, também corresponderam à lógica apresentada neste trabalho.

Mendes *et al.* (2020) investigaram quatro argamassas com diferentes tipos de agregados miúdos (areia natural, quartzito friável, escória de aciaria e rejeito barragem de minério de ferro). Dentre esses materiais, as argamassas com escória de aciaria apresentaram os melhores resultados em todas as zonas bioclimáticas brasileiras (Mendes J. C., et al., 2020). Esse comportamento foi devido à alta densidade do material e ao alto teor de amorfo da escória de aciaria (52,65%), o que reduziu a condutividade térmica da argamassa produzida com esse agregado (Mendes J. C., et al., 2020).

Franco *et al.* (2019) avaliaram, no *software EnergyPlus*, o desempenho térmico da Vila Sustentável, uma habitação de interesse social na qual os agregados convencionais foram substituídos totalmente por escória de aciaria em argamassas, concretos e blocos de alvenaria; isso melhorou significativamente o desempenho térmico do projeto (Franco, Mendes, Costa, Pira, & Perixoto, 2019).

Já Barreto (2021) constatou que uma argamassa produzida com escória de aciaria proporcionou uma “economia” cumulativa de até 277°C no interior da edificação ao longo do ano, em comparação com uma argamassa de areia de rio.

Quanto a economia dos custos na energia das argamassas aqui avaliadas, os valores atingiram até R\$ 169,21 de economia, em São Joaquim (SC), relativo à argamassa QTZ+5%PEA, comparando com a argamassa REF. A menor economia foi conquistada pela argamassa QTZ no valor de R\$ 3,12, em Corumbá (MS). Ou seja, as argamassas com resíduos mostram-se como uma alternativa promissora melhorando o desempenho térmico da edificação, proporcionando economia nos custos energéticos, além de proporcionar uma destinação adequada para os resíduos gerados pelo setor da mineração e siderurgia.

## Conclusões

O presente trabalho avaliou o desempenho térmico de uma edificação de interesse social revestida por argamassas produzidas com QF e PEA em substituição total à areia de rio. Por meio de simulações computacionais para análise da eficiência energética de uma edificação, os autores buscaram avaliar se as argamassas produzidas com estes resíduos conferem alguma melhoria no desempenho térmico da edificação para cidades com diferentes climas no país.

Em conclusão, as argamassas de resíduos estudadas se mostraram alternativas promissoras para melhorar o desempenho térmico de edificações brasileiras tanto em clima frio, quanto quente. Os melhores resultados deram-se para o clima frio (cidade de São Joaquim), atingindo uma economia de até R\$ 169,21 no custo anual da energia (valor da argamassa QTZ+5%PEA em relação à REF). Além disso, a utilização desses resíduos em materiais de

construção reduz os impactos econômicos e ambientais da sua disposição. Logo, é possível concluir que a produção de matrizes cimentícias com resíduos da mineração e da siderurgia podem proporcionar um melhor desempenho térmico das edificações no Brasil.

## Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 00. Este trabalho também foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) – nº 5.43/2021. Agradecemos à Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e à Pró-reitora de Pesquisa, Pós-graduação e Inovação (PROPI).

## Referências

- ABNT. (2021). *NBR 15575: Edifícios Residenciais - Desempenho*. Rio de Janeiro.
- Andrade, H. D., Carvalho, J. M., Costa, L. C., Elói, F. P., Silva, K. D., & Peixoto, R. A. (2021). Mechanical performance and resistance to carbonation of steel slag reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 298, 123910.
- Barreto, R. R. (2021). Estudo da Aplicabilidade de Argamassas Produzidas com Resíduos da Mineração e Siderurgia no Desempenho Térmico de uma Edificação de Interesse Social. *Universidade Federal de Ouro Preto*.
- Carvalho, J. M., Melo, T. V., Fontes, W. C., Batista, J. O., Brigolini, G. J., & Peixoto, R. A. (2019). More eco-efficient concrete: An approach on optimization in the production and use of waste-based supplementary cementing materials. *Construction and Building Materials*, 206, 397-409.
- Celesc. (2022). Retrieved 11 18, 2022, from Tarifas e taxas de energia: <https://www.celesc.com.br/tarifas-de-energia>
- Collares, E., Jr., F. I., & Motta, L. A. (2012). Evaluation of the aggregate produced from wastes of quartzite mining sites to use in concrete. *International Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 35(3), 251-266.
- Costa, L. C., Nogueira, M. A., Andrade, H. D., Carvalho, J. M., Elói, F. P., Brigolini, G. J., & Peixoto, R. A. (2022). Mechanical and durability performance of concretes produced with steel slag aggregate and mineral admixtures. *Construction and Building Materials*, 318, 126152.
- Dias, L. S. (2017). *Rejeito de mineração de quartzito como agregado para a produção de argamassa colante*. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto.
- Enel. (2022). *Tarifa de Energia Elétrica*. Retrieved 11 18, 2022, from [https://www.enel.com.br/pt-saopaulo/Para\\_Voce/tarifa-energia-eletrica.html](https://www.enel.com.br/pt-saopaulo/Para_Voce/tarifa-energia-eletrica.html)
- Energisa. (2022). Retrieved 11 18, 2022, from Tipos de tarifas: <https://www.energisa.com.br/Paginas/informacoes/taxas-prazos-e-normas/tipos-tarifas.aspx>
- Franco, L. C., Mendes, J. C., Costa, L. C., Pira, R. R., & Perixoto, R. A. (2019). Design and thermal evaluation of a social housing model conceived with bioclimatic principles and recycled aggregates. *Sustainable Cities and Society*, 51, 101725.
- ICMBio. (2019, 02 20). *Operação combate mineração ilegal na Serra da Canastra*. (Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade) Retrieved 01 15, 2022, from <https://www.icmbio.gov.br/portal/ultimas-noticias/20-geral/10222-operacao-combate-exploracao-ilegal-de-quartzitos-na-serra-da-canastra>
- Lucena, F. (2022, 01 14). *Diário do Rio*. Retrieved 04 11, 2022, from <https://diariodorio.com/fortes-chuvas-podem-derrubar-montanha-de-lixo-quimico-no-principal-rio-que-abastece-o-rio-de-janeiro-de-agua/#>
- Martins, A. C., Carvalho, J. M., Costa, L. C., Andrade, H. D., Melo, T. V., Ribeiro, J. C., . . . Peixoto, R. A. (2021). Steel slags in cement-based composites: An ultimate review on characterization, applications and performance. *Construction and Building Materials*, 291, 123265.
- Martins, L. M. (2022). *Argamassas isolantes térmicas para revestimento com resíduos da mineração e siderurgia*. Ouro Preto, MG: Universidade Federal de Ouro Preto.
- Martins, L. M., Peixoto, R. A., & Mendes, J. C. (2023). Quartzite tailings in civil construction materials: a systematic review. *Clean Technologies and Environmental Policy*.
- Mendes, J. C., Barreto, R. R., Castro, A. S., Brigolini, G. J., & Peixoto, R. A. (2020). Factors affecting the specific heat of conventional and residue-based. *Construction and Building Materials*, 237, 117597.
- Mendes, J. C., Barreto, R. R., de Freitas Vilaça, V., Lopes, A. V., de Souza, H. A., & Peixoto, R. A. (2020). Coating mortars based on mining and industrial residues. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 22, 1569-1586.
- Mendes, V. F., Fardin, W., Barreto, R. R., Caetano, L. F., & Mendes, J. C. (2022). Sensitivity analysis of coating mortars according to their specific heat, specific gravity, thermal conductivity, and thickness in contribution to the global thermal performance of buildings. *Sustainable Materials and Technologies*.

- Ministério das Minas e Energia – MME. (2021). *Plano Nacional de Mineração 2030 (PNM – 2030)*. Brasília.
- Morales, M., Juarez, M., Muñoz, P., Mendívil, M., & Ruiz, J. (2014). Possibilities for improving the equivalent thermal transmittance of single-leaf walls for buildings. *Energy and Buildings*, 473-480.
- Nogueira, G. (2016). A extração de areia em cursos d'água e seus impactos: proposição de uma matriz de interação. *Universidade Federal de Juiz de Fora*.
- Passos, P. M., Caraseck, H., & Amaral, G. M. (2016). Avaliação da capacidade isolante térmica de revestimentos de argamassa. *XVI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*, pp. 0282 - 0298.
- Reis, F. M. (2019). *Estudo do comportamento físico-mecânico de tijolos de solo-cimento com adição de rejeitos de mineração de quartzito*. São Carlos: Universidade de São Paulo.
- Reis, M. J., Collares, G., E., & Reis, F. M. (2017). *Technological assessment of tailings from quartzite mining sites in Alpinópolis (Minas Gerais-Brazil) as aggregates in concrete block paving (CBP)*. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*.
- Santos, D. (2015). *Substituição total do agregado natural por quartzito friável para produção de argamassas mistas de assentamento e revestimento*. Ouro Preto: Federal University of Ouro Preto (Master's Thesis).
- Shi, Y., Chen, H., Wang, C., & Feng, Q. (2015). Preliminary investigation on the pozzolanic activity of superfine steel slag. *Construction and Building Materials*, 82, 227-234.
- Veloso, A. C., Souza, R. V., & Koury, R. N. (2017). Research of Design Features that Influence Energy Consumption in Office Buildings in Belo Horizonte, Brazil. *Energy Procedia*, 101-110.

## Influência das argamassas de revestimento na inércia térmica e isolamento térmico da edificação em climas quentes

Vítor Freitas Mendes<sup>1</sup>, Letícia Matias Martins<sup>1</sup>, Júlia Castro Mendes<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil

### Abstract

As argamassas de revestimento produzidas com agregados convencionais já foram alvo de alguns estudos, na avaliação do desempenho térmico de edificações. Este trabalho busca interpretar mais profundamente os resultados de desempenho térmico que podem ser obtidos com a variação das propriedades termofísicas dessas argamassas, em climas quentes. Foi avaliada a influência das propriedades das argamassas na inércia térmica e no isolamento térmico da edificação, simulada no *EnergyPlus* em Brasília (DF) e Camaquã (RS). Os resultados indicaram um aumento da inércia e do isolamento térmicos da edificação, em ambas localidades, quando a espessura, calor específico, condutividade e massa específica são aumentados. Em resumo, dentro da faixa de valores estudada, as argamassas podem impactar positivamente até 33% na inércia térmica e até 13% no isolamento térmico da edificação. Isso aponta o lado vantajoso de se atentar para o adequado ajuste das propriedades termofísicas de argamassas de revestimento.

### Introdução

No setor da construção civil, a eficiência energética corrobora para a redução do consumo de energia e, ao mesmo tempo, deriva de uma manutenção ou melhoria do desempenho térmico das edificações. Vários autores apontam o potencial das envoltórias na contribuição da eficiência energética de edificações (Gao, Liu, Gao, Hwang, & Radermacher, 2021; Santos-Herrero, Lopez-Guede, Abascal, & Zulueta, 2022). Assim, as propriedades termofísicas dos materiais integrantes das envoltórias têm influência importante no desempenho térmico das edificações. Logo, o uso de argamassa de revestimento com propriedades termofísicas melhoradas pode ser vantajoso.

Mendes et al. (2020), por exemplo, observaram que o aumento do calor específico e a redução da condutividade térmica de argamassas produzidas com resíduos de indústria ou mineração levam a um melhor desempenho térmico total da edificação. Ainda, Benmansour et al. (2014) constataram que argamassas incrementadas com fibra de palmeira garantem menor condutividade térmica e massa reduzida. Em geral, esses e outros estudos avaliam principalmente o impacto que diferentes adições de materiais causam nas propriedades termofísicas de argamassas. Com relação às argamassas convencionais para revestimento e sua influência no desempenho

térmico de edificações, Mendes et al. (2022) constataram que o ajuste correto das propriedades termofísicas pode ser considerado como uma estratégia passiva complementar promissora para alcançar a eficiência energética das edificações. Eles observaram uma diferença anual de 4,87 kWh/m<sup>2</sup> de demanda energética, variando as propriedades termofísicas da argamassa de uma residência simulada em Curitiba (PA), por exemplo.

Contudo, este trabalho visa fazer uma interpretação mais densa desses resultados de desempenho térmico que podem ser obtidos com a variação das propriedades termofísicas das argamassas convencionais para revestimento, quando aplicadas em climas quentes. Em outras palavras, essa melhoria no desempenho térmico será avaliada, aqui, à luz do isolamento térmico e da inércia térmica propiciados por esse material à edificação, a partir de dois métodos: Métodos dos Picos Acumulados de Temperatura (MPAT) (Mendes, Fardin, Barreto, Caetano, & Mendes, 2022) e Método das Diferenças Acumuladas de Temperatura (MDAT) (Mendes, et al., 2021). Esses métodos foram selecionados, pois são aplicáveis a qualquer edificação independentemente de métodos ativos para conforto térmico, como o que é requerido em uma análise de carga térmica. Assim, este trabalho pretende auxiliar na tomada de decisão para um projeto energeticamente eficiente e no desenvolvimento de materiais de construção isolantes.

### Experimento

A metodologia deste trabalho foi dividida em 4 partes. Como trata-se de avaliar a influência das propriedades termofísicas das argamassas no desempenho da edificação, foram: (i) determinados os valores de cada uma dessas propriedades; e (ii) feitas simulações energéticas, incorporando combinações desses valores no modelo da edificação para duas regiões do Brasil. Com os resultados obtidos das simulações, foram: (iii) adotados os métodos MPAT e MDAT e, assim, (iv) avaliados a inércia e isolamento térmicos propiciados à edificação.

### Propriedades termofísicas das argamassas de revestimento

Essas argamassas foram consideradas em ambos os lados de todas as paredes da edificação. Mendes, et al. (2020) compararam a condutividade térmica ( $\lambda$ ) com a massa específica ( $\rho$ ) de mais de 30 argamassas convencionais (com agregados convencionais), encontrando uma relação expressa em (1) ( $R = 0,89$ ).

$$\lambda \text{ (kW/(m}\cdot\text{K))} = \rho \text{ (kg/m}^3\text{)} \times 0,0011 - 1,0757 \quad (1)$$

Dessa forma, seguindo as propriedades observadas por Mendes et al. (2020), as massas específicas das argamassas do presente estudo tiveram seus valores variando conforme a condutividade térmica. A Tabela 1 apresenta os valores considerados para as propriedades termofísicas das argamassas. Em relação à espessura, a norma NBR 13749 (ABNT, 2013) determina que, para paredes internas, ela deve variar entre 5 e 20 mm, e, para as externas, 20 e 30 mm. Contudo, na prática, a maioria das argamassas de revestimento variam entre 10 e 30 mm. Quanto às demais propriedades, elas foram variadas conforme se verifica frequentemente na literatura especializada. Destaca-se, na tabela, os valores padrões (valor médio ou o que é mais utilizado) colocados com uma porcentagem relativa de 100% e tendo indicado o quanto os demais valores representam sob esses padrões.

Tabela 1: Propriedades termofísicas das argamassas

Propriedade	Valor	% relativa
Espessura - e (mm)	10	50
	15	70
	20	100
	25	125
	30	150
Cond. Térmica - $\lambda$ :	1,15: 2023,36	100
Massa específica correspondente - $\rho$ (W/(m·K)): (kg/m <sup>3</sup> )	0,86: 1762,00	75
	0,57: 1500,64	50
	0,29: 1239,27	25
Calor específico - c J/(kg·K)	500	50
	750	75
	1000	100
	1250	125
	1500	150
	2000	200

As propriedades elencadas foram combinadas de todas as maneiras possíveis, resultando em 120 combinações, i.e., 120 tipos de argamassa de revestimento, as quais foram empregadas nas modelagens para simulação energética.

### Simulações energéticas

Neste trabalho, uma residência hipotética de interesse social foi simulada no *software EnergyPlus*, versão 8.9. Essa edificação é unifamiliar e térrea, com uma área total de 46 m<sup>2</sup>. A Figura 1 apresenta uma visão geral dela.



Figura 1: Esquema da residência: esquerda – modelo 3D; direita – planta baixa.

As paredes da residência têm seu núcleo de tijolo cerâmico estrutural de 14 cm de espessura, revestido com

argamassa (reboco) em ambos os lados, com as variações das propriedades termofísicas já descritas. Todas as paredes têm uma pintura que garante uma absorvância térmica, solar e visível  $\alpha = 0,5$  (ABNT, 2022). Os vidros foram considerados simples e incolor de 6 mm de espessura e todos os demais materiais da edificação (vidraçados, madeiramento, concreto etc.) seguiram os valores de referência do *EnergyPlus*.

Durante as análises, notou-se a sala com maior variação de temperatura ao longo dos dias e do ano, sendo considerada como o ambiente mais crítico. Por isso, todas as análises centraram-se nos resultados dessa zona térmica. Não foi considerada carga térmica interna na edificação (ex. luzes, equipamentos elétricos e pessoas), uma vez que buscou-se isolar o efeito das argamassas no desempenho térmico total do edifício. A residência foi orientada para o Norte geográfico, sem nenhum sombreamento sobre ela (exceto os beirais de algumas fachadas, conforme Figura 1) e com o piso em contato com o solo. Fixou-se uma taxa de 1 renovação de ar por hora, através das frestas da envoltória.

Para avaliar a influência das argamassas segundo o clima, escolheu-se duas cidades quentes: Camaquã (RS) e Brasília (DF), ambas brasileiras, localizadas nas zonas bioclimáticas 2 e 4, respectivamente (ABNT, 2022). Camaquã tem um verão morno e abafado e um inverno ameno, além de uma frequência constante de precipitações ao longo do ano e temperatura variando de 10 a 30 °C (Wather Spark, 2022). Já Brasília é uma cidade de clima morno ao longo do ano, tendo, em geral, temperatura variando entre 12 e 29 °C com altas precipitações na primavera e no verão e grande estiagem no restante do ano (Wather Spark, 2022).

Considerando as duas regiões, no total, foram simulados 240 modelos. A confecção desses modelos para simulação (idf) foi em *Visual Basic for Applications* (VBA) e as simulações foram realizadas em grupos no *EnergyPlus*, utilizando os arquivos climáticos TMY, disponíveis no *website* do *EnergyPlus* (2022).

### Método dos Picos Acumulados de Temperatura (MPAT)

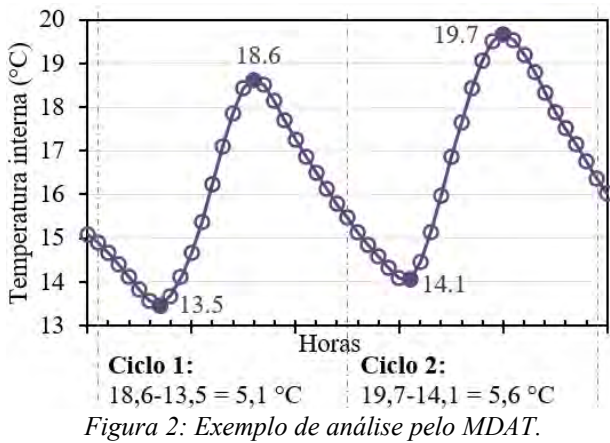
O MPAT foi elaborado por Mendes et al. (2022) e se procede como um índice relacionado ao desempenho térmico de edificações, fortemente relacionado à inércia térmica da construção. Basicamente, ele visa acumular a amplitude térmica diária aferida no ambiente interno mais crítico (sala), ao longo de um ano. Esses resultados de temperatura interna devem estar dispostos de hora em hora e, assim, ele soma as oscilações dadas entre os picos máximos e mínimos proporcionados pela edificação a cada ciclo de 24 horas. A Equação (2) descreve o MPAT, sendo  $T_{i_{\max}}$  e  $T_{i_{\min}}$  iguais às temperaturas horárias internas máxima e mínima nos 365 ciclos de 24 horas.

$$\text{Resultado MPAT} = \sum_{i=1}^{365} (T_{i_{\max}} - T_{i_{\min}})_i \quad (2)$$

Dado ao atraso térmico existente na resposta da temperatura interna frente à externa, Mendes et al. (2022)



indicaram o início dos ciclos às 2h da manhã de um dia e seu término às 2h da manhã do dia seguinte. Assim, quanto menor for o resultado para MPAT, melhor será a capacidade da edificação em garantir independência climática, dado a uma maior inércia térmica dos materiais que a compõem. Todos os cálculos exigidos por esse método foram automatizados em VBA, incluindo a coleta de informações de cada resultado das simulações energéticas. A Figura 2 exemplifica graficamente o MPAT para dois ciclos de 24 horas.

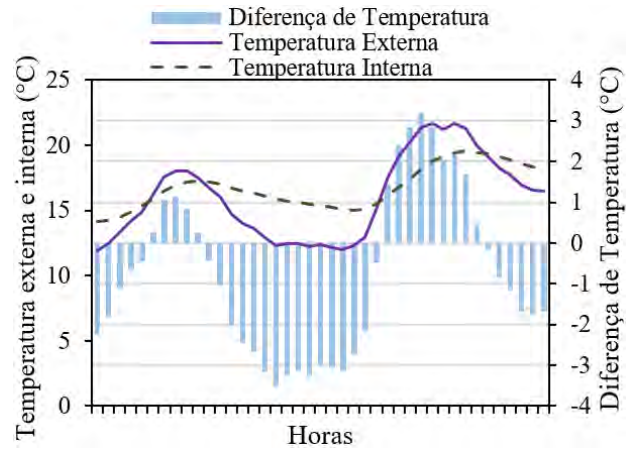


### Método das Diferenças Acumuladas de Temperatura (MDAT)

O MDAT foi criado por Mendes et al. (2021) e funciona como um índice que visa medir o quanto um certo material de construção corrobora como técnica passiva de isolamento térmico da edificação, que é uma importante propriedade para o seu desempenho térmico. Ele acumula os módulos das diferenças de temperatura horária existentes entre o exterior e o ambiente interno mais crítico da edificação (sala, neste caso), ao longo de um ano climático. A Equação (3) descreve o MDAT, sendo  $T_e$  e  $T_i$  iguais às temperaturas horárias externa e interna à edificação, respectivamente, ao longo do ano.

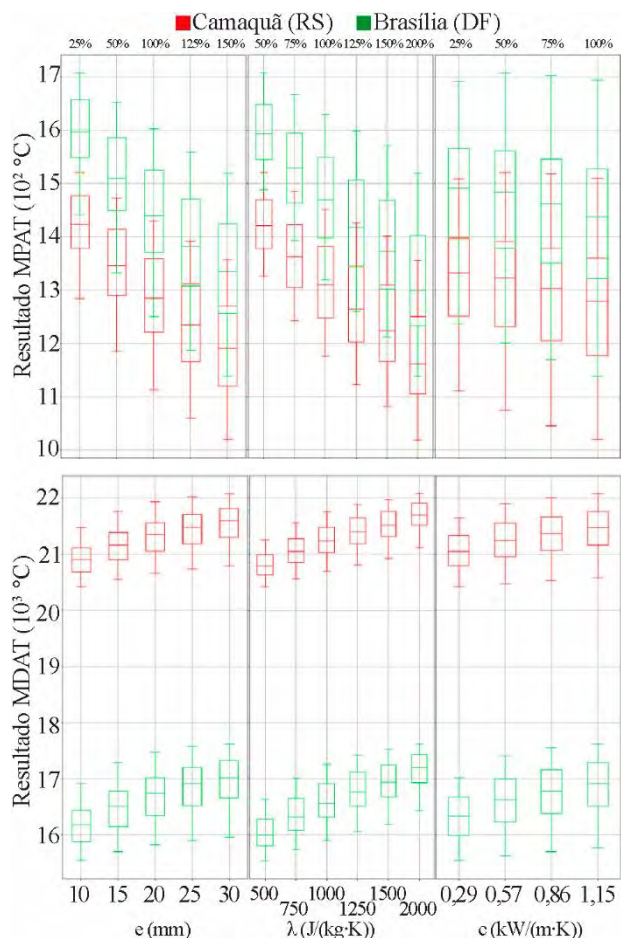
$$Resultado\ MDAT = \sum_{i=1}^{8760} |T_e - T_i|_i \quad (2)$$

Dessa forma, aquele modelo que obter um maior resultado para o MDAT será o qual garante uma melhor capacidade de isolamento à edificação, garantindo o ambiente interno mais bem isolado. Aos moldes do MDAT, o MPAT também foi processado automaticamente em VBA. A Figura 3 exemplifica graficamente o MDAT para um determinado intervalo. Com fins didáticos, na Figura 3, foi desconsiderado o módulo das diferenças de temperatura, apesar de ter sido considerado no cálculo do MDAT nos resultados deste trabalho.



### Resultados

As Figuras 4 apresenta, por meio de gráficos de vela, os resultados obtidos pelas 120 argamassas nas duas localidades brasileiras, utilizando o MPAT e MDAT.



Já a Tabela 2 apresenta as argamassas que obtiveram o melhor e o pior resultado em cada método, além daquelas que tiveram suas propriedades ajustadas segundo valores padrões. Na Tabela 2, o valor após “e” corresponde à

espessura em mm, “ $\lambda$ ” à condutividade térmica em  $W/(m \cdot K)$  e “ $c$ ” ao calor específico em  $J/(kg \cdot K)$ .

Tabela 2: Resultados, para cada cidade e método, das argamassas melhores, piores e padrões.

Cidade: Camaquã (RS)			
Método	Classificação	Argamassa	Resultado (°C)
MPAT	melhor	e30- $\lambda$ 1.15-c2000	1020
	padrão	e20- $\lambda$ 1.15-c1000	1275
	pioir	e10- $\lambda$ 0.29-c500	1521
MDAT	melhor	e30- $\lambda$ 1.15-c2000	22075
	padrão	e20- $\lambda$ 1.15-c1000	21478
	pioir	e10- $\lambda$ 0.29-c500	20424
Cidade: Brasília (DF)			
Método	Classificação	Argamassa	Resultado (°C)
MPAT	melhor	e30- $\lambda$ 1.15-c2000	1138
	padrão	e20- $\lambda$ 1.15-c1000	1431
	pioir	e10- $\lambda$ 0.29-c500	1707
MDAT	melhor	e30- $\lambda$ 1.15-c2000	17620
	padrão	e20- $\lambda$ 1.15-c1000	16915
	pioir	e10- $\lambda$ 0.29-c500	15542

## Discussão e análise dos resultados

De maneira geral, nota-se que os resultados das simulações em localidades diferentes obtiveram um padrão de desempenho semelhante, variando, contudo, a grandeza desses valores aferidos. Percebe-se que o clima de Camaquã proporciona menores amplitudes térmicas internamente (resultados do MPAT, Figura 4 cima) e maiores acumulados de diferença de temperatura externa e interna (resultados do MDAT, Figura 4 baixo), quando comparado com os valores obtidos na cidade de Brasília. Ao analisar o perfil de temperatura das duas cidades, nota-se que Brasília garante maior diferença entre temperaturas externas mínimas e máximas ao longo do ano (Wather Spark, 2022). Ao mesmo tempo, Camaquã tem nebulosidade (60% em média) em quase todo o ano, além de uma precipitação quase contínua em todos os meses, com mais de 100mm, em média (Wather Spark, 2022). Esses perfis climáticos das cidades podem ter sido o principal fator que refletiu em maiores resultados de MPAT para Brasília e de MDAT para Camaquã.

Analisando somente os resultados de MPAT (Figura 4 cima), verifica-se que, quanto maior os valores de espessura, condutividade térmica e calor específico da argamassa, maior é a inércia térmica da edificação, já que conferiram menores resultados de MPAT. Em outras palavras, quanto maior for o valor das propriedades termofísicas da argamassa, menor é a amplitude térmica da edificação, proporcionando maior estabilidade na temperatura interna. Quanto ao calor específico e à espessura, esse efeito é notório, já que eles contribuem para o aumento da capacidade térmica da edificação. A capacidade térmica é a propriedade do material que pode ser equacionada pelo produto entre a espessura, a massa específica e o calor específico do mesmo (ABNT, 2022). Ela garante à edificação menores amplitudes térmicas no ambiente interno. Contudo, a redução da condutividade térmica das argamassas convencionais também é

interessante para o aumento da inércia térmica da edificação, pois a condutividade está relacionada com a massa específica das argamassas convencionais, como já reportado anteriormente neste trabalho.

A condutividade térmica das argamassas está muito mais relacionada com a microestrutura física do compósito do que com a sua estrutura química (Mendes J. C., Barreto, Costa, Brigolini, & Peixoto, 2020). Assim, quando se aumenta a condutividade térmica do material, também se aumenta a massa específica do mesmo, conferindo mais capacidade térmica, refletindo em uma maior inércia térmica à edificação. Por outro lado, diminuindo a condutividade térmica (e/ou a espessura e/ou o calor específico) da argamassa, reduz-se a capacidade térmica da mesma, gerando menor inércia térmica à edificação, reduzindo os resultados de MPAT.

Por sua vez, ao analisar os resultados de MDAT (Figura 4 baixo) percebe-se que o aumento do isolamento térmico da edificação acompanha o aumento da espessura, do calor específico e da condutividade térmica da argamassa, uma vez que os resultados de MDAT crescem dessa forma. Contudo, é importante entender porque valores altos de condutividade proporcionaram maiores diferenças de temperatura entre o ambiente externo e interno à edificação, já que é algo contraintuitivo. Primeiramente, sabe-se que o isolamento térmico de um material é a capacidade que o componente tem de evitar a transferência de calor por meio de si. Entretanto, os resultados de MDAT não se tratam somente da argamassa de revestimento e, sim, da edificação como um todo. Logo, o isolamento térmico aqui aferido é uma espécie de panorama geral do quão isolada a edificação consegue estar, frente ao clima das cidades, em termos de temperatura. Ou seja, os resultados presentes na Figura 4 (baixo) indicam a capacidade que a edificação tem de evitar a equiparação da temperatura interna com a externa.

A razão de uma maior condutividade térmica gerar um maior isolamento térmico também pode estar relacionada com o fato da condutividade das argamassas convencionais variar conforme a massa específica aparente das mesmas (Mendes J. C., Barreto, Costa, Brigolini, & Peixoto, 2020). Entendendo que a argamassa com condutividade térmica aumentada também é sinônimo de massa específica aumentada, e analisando todo o cenário disposto na Figura 4, consegue-se perceber que uma maior capacidade térmica da argamassa garante à edificação um maior isolamento térmico. Isso, por mais que uma maior capacidade térmica não gere uma menor transmitância térmica (já que a condutividade é relacionada à massas específica das argamassas convencionais). Nesse sentido, pode-se dizer que a edificação sofreu mais influência no seu desempenho térmico com os valores da capacidade térmica do que com os da transmitância térmica da argamassa.

Franco et al. (2019) observaram um comportamento parecido, quando avaliaram o desempenho térmico de concretos e argamassa com resíduos de mineração e de siderurgia, no clima de Belo Horizonte (zona bioclimática 3). Na pesquisa de Franco et al. (2019), foi verificado que

a troca de areia de rio (material natural e convencional) por escória de aciaria (material sintético e não convencional) causou uma diminuição na condutividade térmica (até 76%) e um aumento na massa específica (até 26%) de argamassas, blocos e concretos, os quais melhoraram significativamente o desempenho térmico da edificação. Contudo, a combinação de uma condutividade térmica reduzida com uma massa específica aumentada foi possível somente graças à composição morfológica da escória de aciaria (amorfa e composta por minerais de alta massa molecular) (Franco, Mendes, Costa, Pira, & Peixoto, 2019).

Essas discussões se concretizam, quando verifica-se a Tabela 2. A argamassa que garante melhores resultados de desempenho térmico à edificação, pelos dois métodos e nas duas cidades, foi aquela que tem todas as suas propriedades termofísicas aumentadas ao máximo. Enquanto isso, a pior argamassa foi aquela que tem todas as suas propriedades diminuídas ao mínimo. A argamassa padrão obteve valores medianos em todos os casos, o que era de se esperar, haja vista os valores de suas propriedades não serem extremados (máximo ou minimamente).

Assim, nota-se que as argamassas de revestimento da edificação conseguem impactar em até 33% na inércia térmica (segundo MPAT) e até 8% no isolamento térmico (segundo MDAT) da edificação na cidade de Camaquã. Considerando Brasília, as argamassas podem impactar em até 33% na inércia térmica e até 13% no isolamento. Segundo Mendes et al. (2020), essas propriedades termofísicas otimizadas podem ser atingidas com a seleção adequada das matérias primas das argamassas, como os aditivos.

## Conclusão

O presente trabalho investigou a contribuição das propriedades termofísicas das argamassas de revestimento para o isolamento térmico e inércia térmica de uma edificação simulada, no *EnergyPlus*, em duas localidades de clima quente (Camaquã e Brasília). Foram analisadas 120 argamassas com combinações de valores de espessura, condutividade térmica, massa específica e calor específico distintos. A avaliação dos resultados procedeu-se com o Método da Diferença Acumulada de Temperatura (MDAT) (Mendes, et al., 2021) e o Método dos Picos Acumulados de Temperatura (MPAT) (Mendes, Fardin, Barreto, Caetano, & Mendes, 2022).

Os resultados indicaram que as propriedades termofísicas das argamassas analisadas têm uma relação diretamente proporcional com a melhoria do isolamento térmico e da inércia térmica da edificação. Notou-se que, quando essas propriedades são maximizadas (incluindo a condutividade térmica), ocorre o melhor isolamento térmico e inércia térmica da edificação (trata-se da argamassa e30-λ1.15-c2000). Ao mesmo modo, verificou-se o pior isolamento térmico e inércia térmica da edificação para quando a argamassa teve suas propriedades termofísicas minimizadas (e10-λ0.29-c500).

Como o presente trabalho analisou argamassas convencionais (produzidas com agregados convencionais), a diminuição da condutividade térmica está atrelada à redução da massa específica. Por isso, valores maiores de condutividade térmica levaram a um menor inércia e isolamento térmicos da edificação. Os resultados também mostraram uma maior contribuição das propriedades relativas à capacidade térmica da argamassa para o desempenho térmico da edificação, frente à inércia térmica do material.

Todos as interpretações aqui realizadas centram na edificação analisada, nas localidades selecionadas e na faixa de valores de propriedades termofísicas adotadas. Mais estudos devem ser realizados para interpretações fora dos parâmetros analisados. Entretanto, todos os resultados deste trabalho mostraram que a argamassa de revestimento pode contribuir para uma melhor inércia térmica e um melhor isolamento térmico da edificação, fatores esses necessários para a resolução do seu desempenho térmico.

## Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 00. Este trabalho também foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) – n° 5.43/2021. Agradecemos à Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e à Pró-reitora de Pesquisa, Pós-graduação e Inovação (PROPMI).

## Referências

- ABNT. (2013). *NBR 13749 - Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Especificação*. Rio de Janeiro.
- ABNT. (2022). *NBR 15220 - Desempenho térmico em edificações*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Benmansour, N., Agoudjil, B., Gherabli, A., Kareche, A., & Boudenne, A. (2014). Thermal and mechanical performance of natural mortar reinforced with date palm fibers for use as insulating materials in building. *Energy and Buildings*, 81, 98-104. doi:10.1016/j.enbuild.2014.05.032
- EnergyPlus. (2022). *Weather Data by Country*. Acesso em 18 de 11 de 2022, disponível em [https://energyplus.net/weather-region/south\\_america\\_wmo\\_region\\_3/BRA](https://energyplus.net/weather-region/south_america_wmo_region_3/BRA)
- Franco, L. C., Mendes, J. C., Costa, L. C., Pira, R. R., & Peixoto, R. F. (2019). Design and thermal evaluation of a social housing model conceived with bioclimatic principles and recycled aggregates. *Sustainable Cities and Society*. doi:10.1016/j.scs.2019.101725
- Gao, L., Liu, T., Gao, T., Hwang, Y., & Radermacher, R. (2021). Comparing deep learning models for

- multi energy vectors prediction on multiple types of building. *Appl. Energy*, 301, 117486.
- Mendes, C. J., Barreto, R. R., Castro, A. S., Brigolini, J. G., & Peixoto, R. A. (2020). Factors affecting the specific heat of conventional and residue-based. *Construction and Building Materials*, 237, 117597.  
doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117597
- Mendes, J. C., Barreto, R. R., Costa, L. C., Brigolini, G. J., & Peixoto, R. A. (2020). Correlation Between Ultrasonic Pulse Velocity and Thermal Conductivity of Cement-Based Composites. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 39, 36.  
doi:https://doi.org/10.1007/s10921-020-00680-7
- Mendes, V. F., Fardin, W., Barreto, R. R., Caetano, L. F., & Mendes, J. C. (2022). Sensitivity analysis of coating mortars according to their specific heat, specific gravity, thermal conductivity, and thickness in contribution to the global thermal performance of buildings. *Sustainable Materials and Technologies*, 31, e00381.
- Mendes, V. F., Fardin, W., Barreto, R. R., Martins, L. M., Caetano, L. F., & Mendes, J. C. (2021). Novo método de análise da contribuição das propriedades térmicas de materiais de construção no desempenho térmico total. *XVI Cong. latinoamericano de patología de la construcción*, 150-162.
- Santos-Herrero, J., Lopez-Guede, J., Abascal, I. F., & Zulueta, E. (2022). Energy and thermal modeling of an office building to develop an artificial neural networks model. *Sci. Rep.*, 12, 8935.
- Wather Spark. (2022). *Clima e condições meteorológicas médias em Brasília no ano todo*. Acesso em 18 de 11 de 2022, disponível em <https://pt.weatherspark.com/y/30238/Clima-caracter%C3%ADstico-em-Bras%C3%ADlia-Brasil-durante-o-ano>
- Wather Spark. (2022). *Clima e condições meteorológicas médias em Camaquã no ano todo*. Acesso em 18 de 11 de 2022, disponível em <https://pt.weatherspark.com/y/29680/Clima-caracter%C3%ADstico-em-Camaqu%C3%A3-Brasil-durante-o-ano>

## Evaluación del Desempeño Térmico de Densificar Diversas Formas Urbanas. Estudio para una Ciudad Árida Durante el Periodo de Verano

María Belén Sosa<sup>1</sup>, Erica Correa<sup>1</sup>, María Alicia Cantón<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE), CONICET, Mendoza, Argentina

### Resumen

La extensión física de las ciudades consume cada vez más suelo, y modifica las condiciones microclimáticas. Este trabajo investiga las relaciones entre forma, densidad y compacidad del ambiente construido y el comportamiento térmico para cuantificar el impacto que genera densificar barrios residenciales de baja densidad implantados en zonas áridas durante el verano. Para ello se caracterizó, monitoreó térmicamente, modeló y ajustó con el software ENVI-met, 21 escenarios. Los hallazgos muestran que un aumento en la densidad no siempre compromete el comportamiento térmico exterior. Se identificó que mantener constante el valor de compacidad en las manzanas contribuye a disminuir el impacto térmico dentro de un área. Los resultados buscan promover la inclusión del diagnóstico microclimático de áreas urbanas consolidadas y en desarrollo, en pos de mejorar la calidad medioambiental de las ciudades.

### Introducción

El último informe de UN-HABITAT indica que el mundo continúa experimentando un aumento de la población que habita en las ciudades. Aunque, las huellas urbanas están creciendo más rápido que la población, en el contexto latinoamericano la expansión aumentó 3.5 veces en relación con el crecimiento de la población urbana y se estima que para 2030 las ciudades cubran tres veces más tierra que en el año 2000, con gran parte de esta expansión en sectores críticos de biodiversidad (Informe mundial de las ciudades, 2020).

La expansión desenfadada de las áreas urbanas impacta en el consumo de energía, las emisiones de gases de efecto invernadero, el cambio climático y la degradación ambiental (IPCC, 2021). En particular, la forma de crecimiento y disposición de esta expansión de superficie urbanizada modifica, entre otros factores, las condiciones microclimáticas del sitio de inserción (Castillo et al., 2021; Sosa et al., 2020; Higuera, 2006). Entre los mayores impactos sobre estos patrones se destacan los fenómenos de isla de calor, olas de calor y calentamiento urbano (Harmay y Choi, 2022; Lemoine Rodríguez, 2021, Correa, 2006). Siendo estos fenómenos de mayor ocurrencia e impacto en ciudades insertas en climas áridos (Dargahian et al., 2021; Haddad et al., 2019; Ghobadi et al., 2018). En este sentido, la forma, tamaño y disposición de la ciudad, la contaminación atmosférica, el calor generado por diversas fuentes antropogénicas, las propiedades termofísicas de las superficies, la sustitución

de vegetación por superficies impermeables, y el aumento de la rugosidad; son los factores que comúnmente alteran las variables microclimáticas y propician la formación de estos fenómenos (Stocco et al., 2021; Alchapar y Correa, 2020; Ruiz et al., 2017).

En la actualidad, el reto de alcanzar desarrollos urbanos sostenibles demanda generar nuevos planteamientos para planificar las áreas urbanas. Esta brecha de investigación se ha explorado parcialmente para las ciudades de zonas áridas, donde se deben replantear los enfoques de planificación a través de los aportes de la investigación y el análisis de casos exitosos que pueda aliviar los efectos negativos de la expansión urbana sobre este clima extremo (Arup 2018).

La forma urbana, entendida como la combinación entre tramas, perfiles y huellas de edificios, es un elemento primordial a considerar para generar espacios exteriores térmicamente habitables, que permiten alcanzar la sostenibilidad ambiental en una comunidad. En este sentido, el diseño urbano compacto ha sido ampliamente reconocido como una herramienta de planificación eficaz y como una forma urbana deseable que permite reducir la huella de carbono, el consumo de energía asociado al transporte (Ma et al., 2015) y la calefacción de las viviendas (Liu y Sweeney, 2012); al mismo tiempo que proporciona servicios accesibles y eficientes a los habitantes (Chao et al., 2019). El desafío se encuentra entonces en poder predecir el impacto térmico de densificar sectores consolidados de una ciudad para alcanzar este modelo de desarrollo compacto, a través de generar y transformar conocimiento científico en herramientas de planificación que sean aplicables al diseño de ciudades más sostenibles (Sosa et al., 2021).

Es por ello que, este trabajo investiga las relaciones entre la combinación de forma, densidad y compacidad del ambiente construido y la respuesta del comportamiento microclimático (temperatura del aire), enfocado en la escala de barrio. El objetivo de este trabajo es cuantificar el impacto microclimático que genera densificar áreas urbanas consolidadas, a través de analizar el comportamiento térmico exterior de diferentes combinaciones entre formas de tramas y huellas de edificios utilizando una herramienta de simulación a escala urbana (ENVI-met).

### Metodología

El abordaje de este trabajo parte de estudios previamente desarrollados por Sosa et al, (2017 y 2018 a y b) donde se

caracterizaron, monitorearon térmicamente, modelaron y ajustaron durante un periodo de verano en el software ENVI-met tres barrios de baja densidad con diferentes formas de tramas: racional, cul-de-sac y orgánica. Estos resultados preliminares permitieron continuar con la investigación en términos de analizar cómo se modifica el comportamiento térmico exterior, durante el verano, al aumentar la densidad en barrios consolidados del Área Metropolitana de Mendoza (AMM).

### Escenarios urbanos

Los escenarios urbanos se diseñaron manteniendo constante una serie de variables tanto morfológicas como materiales y de infraestructura verde, que permiten contrastar el comportamiento térmico resultante. Se generaron un conjunto de 21 escenarios, que resultan de combinar las tres formas de trama -racional, cul-de-sac y orgánica-, con viviendas unifamiliares de un nivel (3 m de altura) y con edificios multifamiliares de tres niveles (9 m de altura), dentro de un área de 250 m x 250 m. Los escenarios se rigen por los lineamientos de la Ley de Loteo de Mendoza (4341/1978), y poseen las siguientes características morfológicas: 20 m de ancho de calle, 110 m de largo de manzana, 50 m de ancho de manzana, orientación manzanas este-oeste. En términos de distribución de densidades y tipos de viviendas para cada forma de trama, se ubicaron en las cuatro manzanas centrales los edificios multifamiliares y se mantuvieron las viviendas unifamiliares en las manzanas de borde de cada barrio. En cuanto a las formas de huella de los edificios multifamiliares, se diseñaron cuatro alternativas que generan un total de siete posibles combinaciones -cinta orientada E-O y N-S, forma de "U", forma de "U" en espejo, peine, peine en espejo, y caja-. Cada huella de edificio mantiene constante el valor de compacidad (0.45) en cada manzana -relación entre áreas abiertas y construidas-, lo que varía es la forma de distribución y agrupamiento según disposición del edificio. Siendo, la superficie de huella de edificio 2592 m<sup>2</sup> y la del espacio abierto de 3145 m<sup>2</sup> para todos los escenarios. La Figura 1 muestra las 21 combinaciones obtenidas.

### Estrategias de disminución del calentamiento urbano

Como fue mencionado, este trabajo se enfoca en cuantificar el impacto microclimático que genera densificar áreas urbanas consolidadas. Por ello, en cada escenario se incorporaron y combinaron dos estrategias reconocidas como las más eficientes en términos de disminución de los fenómenos de isla de calor y calentamiento urbano para zonas áridas (Sosa et al., 2020). Una de ellas relacionada a disponer árboles de alineación de manera regular y en ambos lados de cada calle -cada 6 m- que permiten generar sombras homogéneas sobre las superficies exteriores (Ruiz et al., 2017); y la segunda relacionada a mejorar los albedos de materiales de techos (0.7), paredes (0.3) y calles (0.5), valores recomendados para el AMM por Alchapar y Correa, (2015).

### Simulación microclimática

La temperatura del aire se obtuvo mediante simulaciones con el software ENVI-met previamente ajustadas con los datos microclimáticos obtenidos *in situ* en los tres casos base (Sosa et al., 2018). Los escenarios se modelaron dentro de un área horizontal de 258 m x 258 m (compuesta por grillas de 86 x 86 celdas de 3 x 3 m, dejando 4 celdas a cada lado como áreas de anidamiento). Se utilizaron un total de ocho receptores ubicados en el centro de cada canal vial, para cada escenario: tres se colocaron a lo largo del cañón urbano central de media densidad; uno en el centro del espacio público abierto alrededor de los edificios; y los otros cuatro se ubicaron dentro de los límites del área urbana de baja densidad. En cuanto a las especies arbóreas, se seleccionó el modelo "Tb" (10 m de altura, LAD entre 0,80 y 2,00 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>) de la base de datos ENVI-met PLANTS. Este modelo corresponde a *Morus Alba*, árbol de segunda magnitud. La Figura 2 muestra la distribución de los receptores en el modelo de simulación.

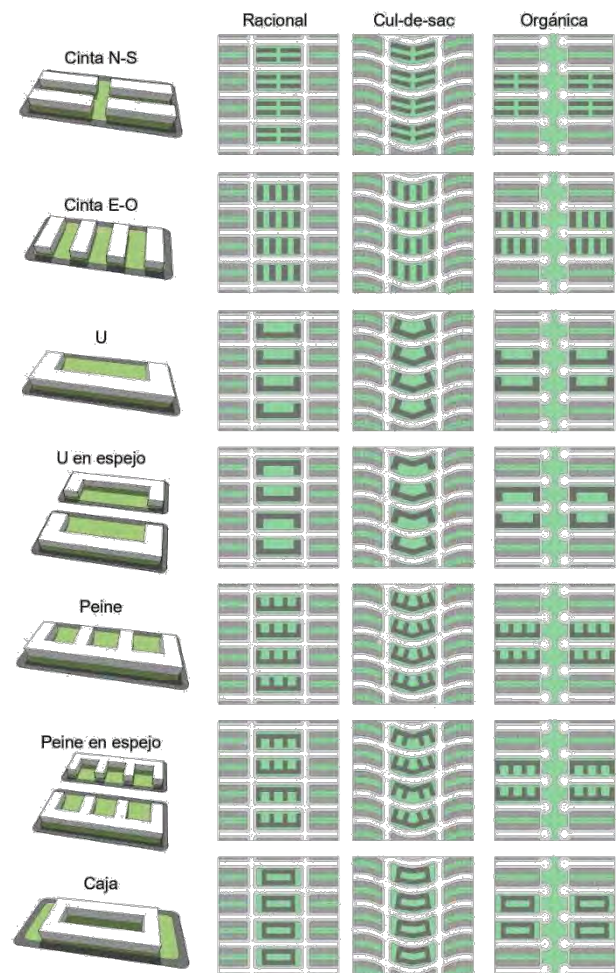


Figura 1: Escenarios urbanos.

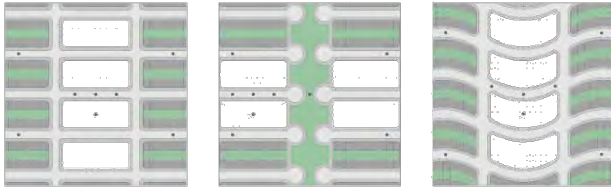


Figura 2: Ubicación de los receptores en el modelo.

**Resultados**

El análisis del comportamiento térmico, obtenido mediante las simulaciones en ENVI-met, se presenta en tres etapas: (i) contraste dentro de cada forma de trama (comportamiento promedio de los tres receptores ubicados a lo largo del cañón urbano central - CU); (ii) contraste del espacio abierto público (receptor ubicado en el centro alrededor de los edificios de media densidad - C); y (iii) contraste de los bordes de baja densidad (comportamiento promedio de los cuatro receptores ubicados en los bordes - B). La Figura 3 muestra los valores de la temperatura del aire máxima, mínima y promedio de cada receptor a 2m de altura para los 21 escenarios, como así también el comportamiento del caso base de baja densidad. Cabe aclarar, que el caso base no posee respuesta térmica a contrastar en la escala del espacio abierto público, ya que los escenarios en baja densidad no destinaban un área común para tal fin.

Forma de trama	Cinta E-O	Cinta N-S	"U"	"U" espejo	Peine	Peine espejo	Caja	Caso base	Temperatura del aire
Racional	38.0°C	38.1°C	38.0°C	38.1°C	37.8°C	38.0°C	37.9°C	36.2°C	T máxima
	25.8°C	25.6°C	25.9°C	25.8°C	25.9°C	25.8°C	25.8°C	25.7°C	T mínima
	31.3°C	31.3°C	31.4°C	31.3°C	31.2°C	31.3°C	31.2°C	31.4°C	T promedio
	38.2°C	38.3°C	37.9°C	38.4°C	37.7°C	38.4°C	37.8°C	-	T máxima
	25.8°C	25.6°C	25.9°C	25.9°C	26.0°C	25.9°C	26.0°C	-	T mínima
	31.4°C	31.3°C	31.4°C	31.5°C	31.3°C	31.5°C	31.4°C	-	T promedio
	38.5°C	38.2°C	38.5°C	38.5°C	38.3°C	38.5°C	38.3°C	38.4°C	T máxima
	25.8°C	25.7°C	25.9°C	25.9°C	25.9°C	25.9°C	26.0°C	25.7°C	T mínima
	31.4°C	31.3°C	31.5°C	31.5°C	31.4°C	31.5°C	31.4°C	31.5°C	T promedio
	39.7°C	39.3°C	39.5°C	39.3°C	39.3°C	39.2°C	39.5°C	39.6°C	T máxima
	26.1°C	26.1°C	26.3°C	26.3°C	26.2°C	26.2°C	26.1°C	25.9°C	T mínima
	32.3°C	32.1°C	32.3°C	32.2°C	32.2°C	32.1°C	32.2°C	31.3°C	T promedio
Cul-de-Sac	40.0°C	39.3°C	39.1°C	39.0°C	38.9°C	38.9°C	38.9°C	-	T máxima
	26.1°C	26.1°C	26.4°C	26.4°C	26.3°C	26.3°C	26.3°C	-	T mínima
	32.5°C	32.1°C	32.2°C	32.2°C	32.1°C	32.1°C	32.1°C	-	T promedio
	39.4°C	39.3°C	39.5°C	39.5°C	39.3°C	39.3°C	39.3°C	38.3°C	T máxima
	26.2°C	26.2°C	26.3°C	26.3°C	26.3°C	26.3°C	26.2°C	25.9°C	T mínima
	32.3°C	32.1°C	32.3°C	32.3°C	32.2°C	32.2°C	32.2°C	31.2°C	T promedio
	37.9°C	38.4°C	38.2°C	38.2°C	37.9°C	38.1°C	38.0°C	38.2°C	T máxima
	25.9°C	25.7°C	25.9°C	25.9°C	25.9°C	25.8°C	25.6°C	26.7%	T mínima
	31.4°C	31.4°C	31.5°C	31.5°C	31.3°C	31.4°C	31.3°C	31.5°C	T promedio
	37.9°C	38.4°C	38.1°C	38.4°C	37.9°C	38.2°C	37.9°C	-	T máxima
	26.0°C	25.6°C	26.0°C	26.0°C	26.0°C	25.9°C	26.0°C	-	T mínima
	31.4°C	31.4°C	31.5°C	31.6°C	31.3°C	31.6°C	31.4°C	-	T promedio
Orgánica	37.9°C	38.2°C	38.2°C	38.2°C	38.0°C	38.0°C	38.0°C	38.8%	T máxima
	26.0°C	25.8°C	25.9°C	26.0°C	25.9°C	25.9°C	25.9°C	25.8%	T mínima
	31.4°C	31.4°C	31.5°C	31.4°C	31.4°C	31.4°C	31.4°C	31.4%	T promedio
	37.9°C	38.2°C	38.2°C	38.2°C	38.0°C	38.0°C	38.0°C	38.8%	T máxima
	26.0°C	25.8°C	25.9°C	26.0°C	25.9°C	25.9°C	25.9°C	25.8%	T mínima
	31.4°C	31.4°C	31.5°C	31.4°C	31.4°C	31.4°C	31.4°C	31.4%	T promedio

Figura 3: Comportamiento térmico de cada receptor, en los 21 escenarios.

Al analizar la Figura 3, se detecta que todas las combinaciones en la forma de trama cul-de-sac se mantienen más cálidas en comparación a las tramas racional y orgánica, para las tres etapas de análisis (CU, C, B). Los comportamientos térmicos más frescos se encuentran en la forma de trama racional en combinación con las formas de huella de edificios "cinta N-S" y "peine". Por otra parte, en la forma de trama cul-de-sac es necesaria la incorporación de forestación que contribuya a sombrear el espacio abierto público, que representa un 24% del total del barrio, esto también contribuiría a balancear la superficie de las áreas de patios privados

(8%) que ocupan un 4% menos que en la trama racional (12%), considerada como la más fresca.

En la etapa de análisis del cañón urbano (CU), se denota que:

- La combinación con mejor comportamiento térmico se genera entre la forma de trama racional y la huella de edificio "peine" (temperatura máxima 37.8°C, promedio 31.2°C), y con la forma de "cinta N-S" (temperatura mínima 25.6°C), siendo el escenario densificado levemente más fresco que el caso base de baja densidad (temperatura máxima 38.2°C, mínima 25.7°C, promedio 31.4°C), ver Figura 4.
- La combinación con peor comportamiento térmico se genera entre la forma de trama cul-de-sac y la huella de edificio "cinta E-O" (temperatura máxima 39.7°C y promedio 32.3°C), y con la forma de "U" y "U espejo" (temperatura mínima 26.3°C), siendo más cálida que el caso base de baja densidad (temperatura máxima 38.3°C, mínima 25.5°C, promedio 31.2°C).

En la etapa de análisis del espacio abierto público (C), se denota que:

- La combinación con mejor comportamiento térmico se genera entre la forma de trama racional y la huella de edificio "peine" (temperatura máxima 37.7°C y promedio 31.3°C), y con la forma de "cinta N-S" (temperatura mínima 25.6°C), ver Figura 4
- La combinación con peor comportamiento térmico se genera entre la forma de trama cul-de-sac y la huella de edificio "cinta E-O" (temperatura máxima 40.0°C y promedio 32.5°C), y con la forma de "U" y "U espejo" (temperatura mínima 26.4°C).

En la etapa de análisis de borde (B), se denota que:

- La combinación con mejor comportamiento térmico se genera entre la forma de trama racional y la huella de edificio "cinta N-S" (temperatura máxima 38.2°C, mínima 25.7°C, promedio 31.3°C), siendo levemente más fresca que el caso base de baja densidad (temperatura máxima 38.5°C, mínima 25.7°C, promedio 31.5°C). La Figura 4 muestra una volumetría de los escenarios más fresco.
- La combinación con peor comportamiento térmico se genera entre la forma de trama cul-de-sac y la huella de edificio "U" y "U espejo" (temperaturas máximas 39.5°C, mínimas 26.3°C y promedios 32.3°C), siendo más cálida que el caso base de baja densidad (temperatura máxima 38.3°C, mínima 25.5°C, promedio 31.2°C).

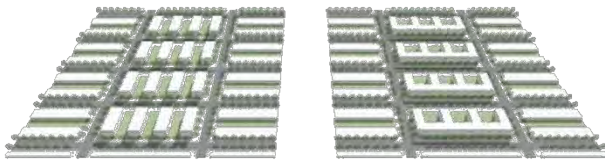


Figura 4: Escenarios más frescos.

## Conclusiones

Desde el abordaje del comportamiento térmico exterior, los hallazgos obtenidos muestran que el aumento de la densidad en áreas consolidadas muestra aspectos positivos como negativos. Un aumento en la densidad no siempre compromete el comportamiento térmico exterior del barrio, considerando que la combinación entre forma de trama-huella de edificio sea adecuada, como es el caso de la trama racional con las huellas “cinta N-S” y “peine”. Es decir que combinar y aumentar densidades dentro de un barrio ofrece oportunidades de planificación que no impactan de manera directa en el comportamiento térmico y permiten mejorar la habitabilidad -confort térmico tanto exterior como interior, para la condición de verano. Por otra parte, no se encontraron grandes diferencias en la temperatura del aire entre las huellas de los edificios analizadas. Lo que indica que mantener constante el valor de compacidad en las manzanas contribuye a disminuir el impacto térmico en un área. Siendo las formas de huella de edificios “cinta N-S” y “peine” las de mejor respuesta térmica, aunque la forma “cinta N-S” limita las posibilidades de utilizar la orientación norte para la bioclimatización de los espacios interiores de las viviendas en los edificios.

Los resultados obtenidos en esta etapa inicial de la investigación serán complementados en etapas posteriores al analizar la respuesta térmica de combinar distintas compacidades con otras variables como es la orientación de trama para el caso del AMM. El estudio busca promover el uso de la evaluación y diagnóstico microclimático mediante herramientas de simulación a escala urbana que permitan definir estrategias direccionadas a mejorar las condiciones térmicas exteriores, y que contribuyan a disminuir los efectos de la urbanización sobre el clima, la calidad de vida de las personas, el consumo de energía y los impactos sobre la salud.

## Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), y por la Agencia Nacional científica y Tecnológica (ANCyT), Argetina.

## Referencias

Alchapar, N. y Correa, E. (2020). Optothermal properties of façade coatings. Effects of environmental exposure over solar reflective index. *Journal of Building Engineering* 32, 1-11.

- Alchapar, N. y Correa, E. (2015). Comparison the Performance of Different Facade materials for Reducing Building Cooling needs. Eco-efficient materials for Mitigating Building Cooling Needs, Woodhead Publishing, Cambridge, 155–194.
- ARUP publications (2018). Cities Alive: Rethinking Cities in Arid Environments.
- Castillo, A., Correa, E., Cantón, M. (2021). Impacto del diseño de modelos urbanos públicos y privados sobre la respuesta térmica del sector de piedemonte. El caso del Área Metropolitana de Mendoza, Argentina. *Cuaderno urbano* 30, 161-191.
- Chao, X., Dagmar, H., Meirong, S., Zhifeng, Y. (2019). The impact of urban compactness on energy-related greenhouse gas emissions across EU member states: Population density vs physical compactness. *Applied Energy* 254.
- Correa, E. (2006). Isla de Calor Urbana. El caso del área metropolitana de Mendoza (Tesis doctoral). Universidad Nacional de Salta.
- Dargahian, F., Heidarnejad, S., Razavizadeh, S. (2021). Investigating the trend of changes in the heat wave properties Related to climate change in arid regions (Case Study: Yazd City) 28, 564-577.
- Fang, C., Wang, S., Li, G. (2015). Changing urban forms and carbon dioxide emissions in China: a case study of 30 provincial capital cities. *Applied Energies* 158, 519-31.
- Ghobadi, A., Khosravi, M., Tavousi, T. (2018). Surveying of Heat waves Impact on the Urban Heat Islands: Case study, the Karaj City in Iran. *Urban Climate* 24, 600-615.
- Haddad, S., Ulpiani, G., Paolini, R., Synnefa, A., Santamouris, M. (2019). Experimental and Theoretical analysis of the urban overheating and its mitigation potential in a hot arid city – Alice Springs. *Architectural Science Review* 63, 425-440.
- Harmay, N., Choi, M. (2022). Effects of heat waves on urban warming across different urban morphologies and climate zones. *Building and Environment* 209.
- Higueras, E. (2006). Urbanismo bioclimático. Barcelona: Gustavo Gili.
- Informe mundial de las ciudades (2020). United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat).
- IPCC (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis.
- Lemoine Rodríguez, R. (2021). Urban form, urban warming and time. From global regularities to local heterogeneities. Tesis doctoral.
- Liu, X., Sweeney, J. (2012). Modelling the impact of urban form on household energy demand and related CO2 emissions in the Greater Dublin Region. *Energy Policy* 46, 359-69.



- Ma, J., Liu, Z., Chai, Y. (2015). The impact of urban form on CO2 emission from work and nonwork trips: the case of Beijing, China. *Habitat International* 47, 1-10.
- Ruiz, M., Sosa, M., Correa, E., Cantón, M. (2017). Design tool to improve daytime thermal comfort and nighttime cooling of urban canyons. *Landscape and urban planning*, 167, 249-256.
- Sosa, M. B. (2018a). Estrategias de mitigación de la isla de calor sustentabilidad ambiental y eficiencia energética de perfiles urbanos de baja densidad en zonas áridas. Tesis doctoral, Universidad Nacional de Salta - Argentina.
- Sosa, M., Correa, E., Cantón, M. (2018b). Neighborhood designs for low-density social housing energy efficiency: Case study of an arid city in Argentina. *Energy and buildings* 168, 137-146.
- Sosa, M., Correa, E., Cantón, M. (2020). Eficacia de estrategias de disminución del calentamiento urbano. Estudio para una ciudad de clima árido. *Informes de la Construcción* 72, 559.
- Sosa, M., Correa, E., Cantón, M. (2021). Enfoque de planificación urbana basada en el desempeño térmico-energético para barrios de climas áridos. *AUS Arquitectura/Urbanismo/Sustentabilidad* 30, 44-51.
- Stocco, S., Cantón, M., Correa, E. (2021). Evaluation of design schemes for urban squares in arid climate cities, Mendoza, Argentina. *Building Simulation* 14, 763-777.

## Rehabilitación energética en Biblioteca del Museo Uriburu en Salta a partir de simulación calibrada con monitoreo higrotérmico

Camila Gea Salim<sup>1</sup>, Silvana Flores Larsen<sup>1</sup>, Marcos Hongn<sup>1</sup>, Silvina González<sup>1</sup>, Gabriel Gea<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional (INENCO), Facultad de Ciencias Exactas.

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería.

Universidad Nacional de Salta, Argentina

### RESUMEN:

Para el abordaje de la rehabilitación energética de edificios patrimoniales y su conservación se requiere de una evaluación del microclima interior. En este trabajo se presenta el monitoreo de un edificio histórico de la ciudad de Salta, Argentina, y las posibilidades de rehabilitación energética de uno de sus espacios críticos (la biblioteca). La evaluación de las posibles mejoras se realizó por simulación computacional con EnergyPlus. La propuesta consiste en mejorar la aislación térmica interior de muros y utilizar un equipo deshumidificador para alcanzar las condiciones propicias de conservación. La inclusión de aislación interior del muro representa ahorros del 20% en el consumo energético.

**Palabras clave:** microclima interior, rehabilitación energética, edificios históricos, conservación

### 1. Introducción

Los edificios históricos y sus colecciones forman parte de nuestro patrimonio cultural. Se encuentran expuestos a diversos agentes de deterioro como condiciones higrotérmicas desfavorables para su preservación, o falta de políticas de mantenimiento, entre otras. La mayoría de los edificios históricos se utilizan actualmente para diferentes funciones, y pertenecen tanto al sector público (funcionando como oficinas, universidades o museos), como al sector privado (residencias privadas, conventos en uso, iglesias).

Este tipo de edificios presenta uno de los consumos energéticos para acondicionamiento térmico más altos del parque edilicio construido, debido especialmente a la alta masa térmica proveniente de muros de gran espesor, sistema constructivo característico de los siglos XVI a XIX. Este gasto energético podría disminuirse enormemente con una adecuada rehabilitación térmica, las cuales involucran estrategias que pueden ser más complicadas de implementar debido a las restricciones arquitectónicas (y artísticas, en caso de muros con frescos) que obligan a preservar la integridad de los edificios.

#### 1.1 Evaluación del microclima interior

La evaluación del microclima interior de los edificios históricos es fundamental tanto para su rehabilitación

energética como para su conservación y la de los objetos que allí se albergan. Las principales variables a analizar son temperatura y humedad relativa, aunque, dependiendo de los casos, también puede ser relevante la iluminación y los niveles de CO<sub>2</sub> (Bonora A. *et. al.*, 2019; Thomson, 1978; Camuffo, 1998). Las fluctuaciones ambientales interiores están fuertemente influenciadas por las condiciones exteriores, pero también por el calor y humedad excesivos aportados por los visitantes, falta de control, o medidas inapropiadas (Ferdyn-Grygierek, J., 2016). El edificio, como envolvente, puede ser considerado un filtro para las condiciones ambientales exteriores y, en algunas ocasiones, permite asegurar el microclima adecuado y su calidad de aire (Strada, 2002). Los estudios realizados sobre edificios históricos ponen énfasis en diferentes aspectos relacionados a la puesta en valor y al tipo de funcionamiento del edificio. Este tema debe ser abordado desde múltiples disciplinas que incluyen humanidades y ciencias, tanto naturales, sociales y formales relativas al acceso al patrimonio cultural, su interpretación, conservación y administración. Todos estos estudios se enmarcan dentro del término “ciencia del patrimonio” (Bonora *et. al.*, 2019).

En los museos es fundamental monitorear las variaciones del microclima interior a lo largo del tiempo para determinar la calidad del microclima en comparación con los estándares recomendados por las normativas para cada tipo de objeto. Es frecuente que las piezas de exhibición se alberguen en edificios que no fueron diseñados para museos.

La literatura científica sobre microclima interior histórico, en general, está compuesta por experiencias específicas sobre edificios: el monitoreo higrotérmico de la Biblioteca Malatestiana de Cesena (Fabbri y Preteli, 2014), la definición de “riesgo del microclima patrimonial (HMR- Heritage Microclimate Risk) aplicado sobre el caso de estudio de Villa Barbaro Maser (Bonora et al, 2019), el monitoreo ambiental integral del Palazzo Grimani en Venecia en donde se evaluaron la temperatura del aire, humedad relativa, superficies de muros, techos, y pisos usando sensores infrarrojos y de contacto, transferencia de vapor entre paredes y aire (Camuffo et al, 2011). La definición de un nuevo enfoque para evaluación de la calidad del ambiente interior a partir de índices definidos para conservación preventiva, confort y sistemas de aire acondicionado elaborado por Corgnati, *et. al.*, 2006.

En Latinoamérica, Silvero *et al.* (2018) evaluó el desempeño térmico de una vivienda en el Centro histórico de Asunción (Paraguay) de clima cálido húmedo a partir de simulación computacional utilizando el software Energy Plus y realizó propuestas pasivas de rehabilitación energética para mejorar el confort térmico y la temperatura operativa interior. En Argentina, Zamora *et al.* (2020) desarrollaron una metodología para determinar la factibilidad de exposición de ciertos objetos para una condición ambiental dada. Los autores procesaron los datos mediante el software LabVIEW y realizaron una clasificación de los materiales de acuerdo a su nivel de sensibilidad.

### 1.2 Microclima interior en bibliotecas

El caso particular de preservación de colecciones de bibliotecas y archivos es de gran interés a nivel nacional e internacional. Niveles inaceptables de temperatura y humedad relativa contribuyen significativamente a la desintegración de los materiales, que suelen ser altamente higroscópicos. En consecuencia, valores altos de humedad relativa pueden fomentar reacciones químicas perjudiciales en los documentos. Otro factor perjudicial son los cambios diarios y estacionales en la temperatura y humedad relativa que producen la expansión y contracción de los materiales, aceleran el deterioro y conducen a daños tan visibles como la deformación del papel y de las cubiertas de libros, y el desmoronamiento de la tinta descamada, y el agrietamiento de emulsiones en fotografías (Northeast Document Conservation Center, 2000).

Los antecedentes en Argentina, respecto del trabajo en bibliotecas, es el extenso monitoreo higrotérmico de 11 bibliotecas y archivos en la ciudad de La Plata realizado por Diulio *et al.* (2019). Los autores evalúan la influencia de la envolvente en la conservación preventiva de libros y documentos a partir de índices de conservación preventiva y de índices de envolvente pasiva.

### 1.3 Rehabilitación energética

El principal desafío de realizar propuestas de mejora en edificios históricos es que no todas las intervenciones son viables para la rehabilitación energética. Las restricciones en las intervenciones dependen de las características y el valor arquitectónico de cada edificio en particular. Existen casos en donde los muros interiores no tienen un valor destacado (detalles, molduras, pinturas, etc.) dejando lugar a la posibilidad de evaluar la inclusión de sistemas de aislación interior a la envolvente edilicia. Martín-Garín *et al.* estudiaron posibles soluciones constructivas basadas en aislación interior a partir de simulaciones higrotérmicas en construcciones históricas de San Sebastián, España.

El monitoreo higrotérmico, además de ser la herramienta para el diagnóstico del edificio, permite evaluar el desempeño de las simulaciones que representan la

situación real. Este procedimiento otorga confianza y solidez en los resultados (Muñoz, A., 2015).

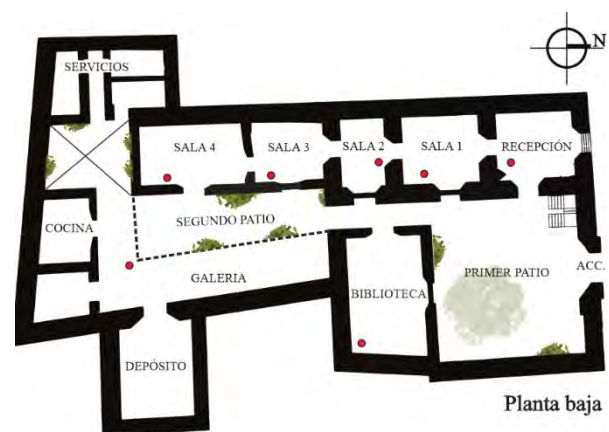
Un método para el abordaje de la simulación se realiza a partir de la recopilación de información, ingreso de datos en el software, creación de un caso base, su respectiva calibración y verificación del desempeño y los cálculos en los ahorros que puedan requerirse en cada caso. (FEMP, 2015).

Si bien existen diversos estudios orientados a la evaluación ambiental de museos, tanto en Europa como a nivel regional, son escasos los trabajos que realizan la evaluación del microclima histórico de los museos bajo las consideraciones de la eficiencia energética. El objetivo de este trabajo es evaluar propuestas de mejora sobre la envolvente del edificio a partir de la simulación energética de una construcción histórica en la ciudad de Salta, Argentina: Museo Casa José E. Uriburu. La evaluación consiste en realizar un monitoreo higrotérmico y simular propuestas de mejora con el software Energy Plus

## 2. Metodología

### 2.1 Descripción del edificio

La ciudad de Salta cuenta con edificios patrimoniales construidos antes del siglo XVIII y se caracterizan por tener muros portantes de gran espesor con aberturas pequeñas y cubiertas de tejas coloniales. Tienen un microclima interior típico de poca amplitud térmica con respecto a un edificio tradicional y son los moderadores entre los objetos que conservan o exponen y el clima exterior.



La Casa Uriburu, ubicada en calle Caseros 417 fue declarada Monumento Histórico Nacional en el año 1955. Es un edificio de configuración a patio, posee muros de adobe con un espesor que varía entre 0,40 y 0,80 m. Los muros de mayor espesor son los de la biblioteca y los de las salas de planta baja que soporta el peso del nivel superior (Fig.1). Los entresijos tienen estructura de madera y solado cerámico y los techos son de estructura

de madera (par y nudillo), cielorraso de cañas y cubierta de tejas.



Figura 1. Fachada Museo Casa Uriburu

En sus salas, el museo expone elementos de la sociedad salteña de fines del período colonial. Además, el edificio cuenta con la biblioteca Monseñor Ángel Vergara, (Figura 2), donde se destacan algunos libros de historia salteña, de arquitectura, libros religiosos, mapas antiguos y documentos históricos de valor para la provincia.



Figura 2. Biblioteca Monseñor Angel Vergara

## 2.2. Monitoreo higrotérmico del edificio

Se realizó un monitoreo continuo de temperatura ( $T$ ) y de humedad relativa ( $HR$ ) durante 15 días consecutivos de verano (20 de diciembre de 2020 al 4 de enero de 2021) y 15 días de invierno (27 de julio al 11 de agosto de 2021). Se utilizaron adquirentes de datos HOBO U12-12 de  $T$  (exactitud:  $\pm 0.35^\circ\text{C}$ , resolución:  $0.03^\circ\text{C}$  a  $25^\circ\text{C}$ ) y  $HR$  ( $\pm 2.5\%$ ,  $0.03\%$ ). Los registros se han almacenado cada 15 minutos. La Figura 3 muestra la ubicación de los sensores instalados en el edificio (6 ambientes en planta baja y uno en planta alta). El sensor que registra  $T$  y  $HR$  exterior fue colocado en la galería del museo, mientras que la radiación solar sobre superficie horizontal fue obtenida de la estación meteorológica Davis Vantage Pro ubicada en el predio del INENCO (Universidad Nacional de Salta-CONICET), a una distancia aproximada de 10 km del centro de la ciudad.

## 2.3. Simulación del comportamiento térmico de la biblioteca

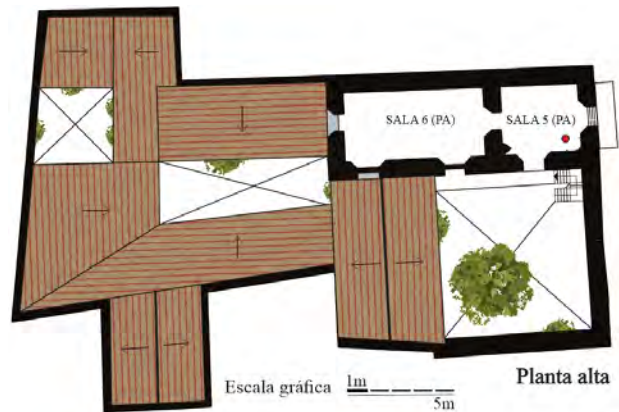


Figura 3. Croquis PB y PA Museo casa Uriburu. En rojo: ubicación de sensores.

La simulación de la biblioteca se realizó mediante Energy Plus 9.1.0, con la interfaz OpenStudio 2.8.0. La geometría y materiales de los elementos constructivos se obtuvieron de los planos, croquis, información histórica y relevamiento visual del edificio. Para los datos meteorológicos se generó un archivo EPW que incluye las variables meteorológicas registradas durante los periodos de monitoreo. Los resultados de la simulación horaria se compararon con los datos experimentales, siguiendo los umbrales recomendados por la normativa ASHRAE Guideline 14 para calibración con datos monitoreados, en donde el MBE (*Mean Bias Error*) debe ser inferior al 10% y el NRMSE (*Normalized Root Mean Square Error*) menor al 30%. Adicionalmente, se calculó el coeficiente de correlación  $\rho$ , que cuantifica el grado de coincidencia los patrones entre las series de datos medidas y simuladas (Taylor, 1997).

A continuación, se utilizó el modelo calibrado para evaluar diferentes propuestas de rehabilitación energética de la biblioteca y cuantificar el potencial de ahorro en cada caso.

## 3. Resultados

### 3.1. Monitoreo higrotérmico

El monitoreo de invierno (Fig. 4) muestra que las  $T$  exteriores oscilaron entre  $6.8^\circ\text{C}$  y  $27.1^\circ\text{C}$ , con  $HR$  inferior a 65% (característica de los inviernos secos y soleados de la ciudad de Salta). En el interior, los registros de  $T$  varían entre  $10.9^\circ\text{C}$  y  $18.9^\circ\text{C}$ , mientras que  $HR$  oscila entre 43 y 79%.

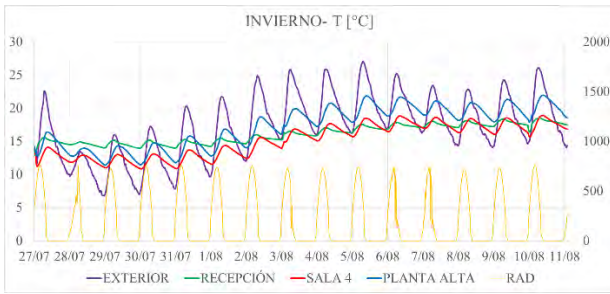


Figura 4: Temperatura monitorada em salas e exterior e radiação solar, em el periodo de invierno.

Cabe destacar el comportamiento de la biblioteca (Fig. 5) con valores de T entre 12 y 18 °C y de HR entre 66 y 76 %. En la figura 5 se observa el rango de T y HR sugerido por normativa para conservación entre 50 y 60 %.

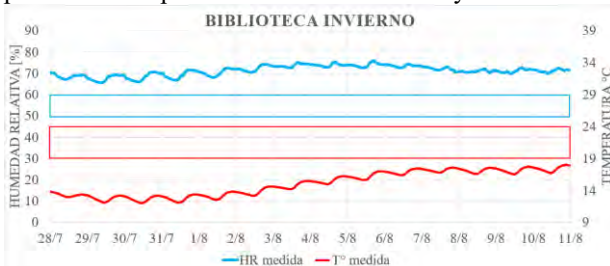


Figura 5: Temperatura y humedad de la biblioteca y rangos sugeridos para conservación y confort, em el periodo de invierno

El monitoreo de verano muestra que las T exteriores oscilaron entre 19.5 y 32.9 °C y las interiores varían entre 22.9 y 32.2 °C (Fig. 6). La HR en el exterior osciló entre 31 y 75 % y para el interior entre 28 y 70%.

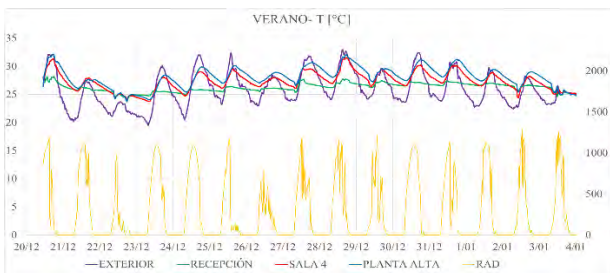


Figura 6: Temperatura monitorada em salas e exterior e radiação solar, em el periodo de verano.

La biblioteca muestra T que oscilaron entre 22.9 y 27.0 °C (Fig. 7). No se cuenta con datos de HR de este local debido a que el sensor colocado para el monitoreo mide únicamente T. Por tratarse de registros elevados de T, la HR desciende por lo que se considera que no es un problema desde el punto de vista de la conservación de objetos en el periodo de verano.

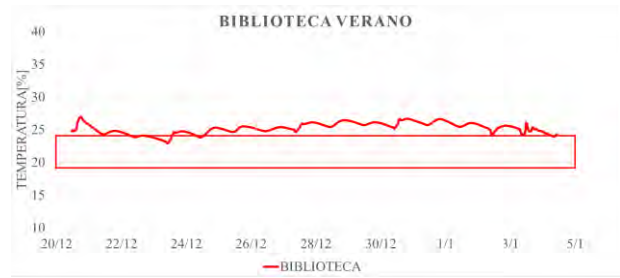


Figura 7: Temperatura de la biblioteca y rango sugerido para conservación y confort, em el periodo de verano.

Como resultado del monitoreo, se propone mejorar el microclima interior de la biblioteca por ser el local que alberga los objetos más valiosos del edificio y el que presenta las peores condiciones de temperatura y humedad para conservación. Al mismo tiempo, es el único local en donde existe una persona trabajando toda la jornada. Debido a los altos niveles de HR, se propone instalar un sistema de aire acondicionado con deshumidificador, priorizando disminuir la energía auxiliar requerida por el sistema de acondicionamiento de aire. Bajo esta consideración, se realizaron las simulaciones del caso base y de 3 propuestas constructivas (Tabla 1): 1- inclusión de aislación térmica interna en muros, 2- inclusión de aislación térmica en techos y 3- control de ganancia directa por uso de elementos de sombreado interior (postigones). Se definió para la simulación un termostato con T de 19 y 24° con el objetivo de abarcar los rangos para la conservación y los de confort del usuario.

CASO BASE	PROPUESTA 1	PROPUESTA 2	PROPUESTA 3
Muros de adobe 0.8m. Cubierta de tejas coloniales asentadas con torta de barro sobre estructura de nudillo y par con cielorraso de baldosas cerámicas.	CASO BASE + Aislación de 0.03 m de poliestireno expandido del lado interior del muro.	CASO BASE + Aislación de 0.075 m de poliestireno expandido en la cubierta.	CASO BASE + PROPUESTA 1 + Apertura y cierre de persiana de ventana al norte controlada*.

Tabla 1. Definición del caso base y tres propuestas de simulación

### 3.2. Calibración del modelo

Los resultados de la calibración de invierno y verano para la biblioteca se muestran en las Figuras 8 y 9, mientras que los resultados estadísticos de la calibración (MBE y RSME) y sus límites de acuerdo a ASHRAE Guideline 14 se muestran en la tabla 2. El modelo calibrado presentó parámetros estadísticos de ajuste dentro de los umbrales sugeridos por ASHRAE, tanto en invierno como en verano. El coeficiente de correlación  $\rho$  resultante es de 94%.

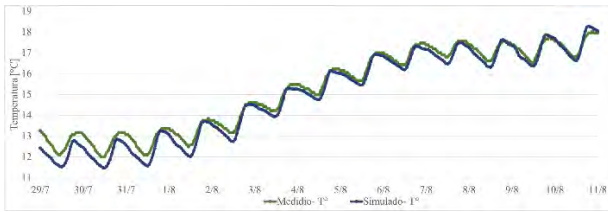


Figura 8. Ajuste de simulación para invierno.



Figura 9. Ajuste de simulación para verano.

Tabla 2. Resultados estadísticos de calibración

	Calibración invierno	Calibración verano	ASHRAE Guideline 14
<b>MBE [%]</b>	<b>1.9</b>	<b>-8.0</b>	10
<b>RMSE [%]</b>	<b>4.8</b>	<b>2.2</b>	30

### 3.3. Propuestas de rehabilitación

La Figs. 10 y 11 muestran los resultados de las cargas de calefacción y refrigeración de la biblioteca (caso base) y de las tres propuestas de rehabilitación sugeridas.

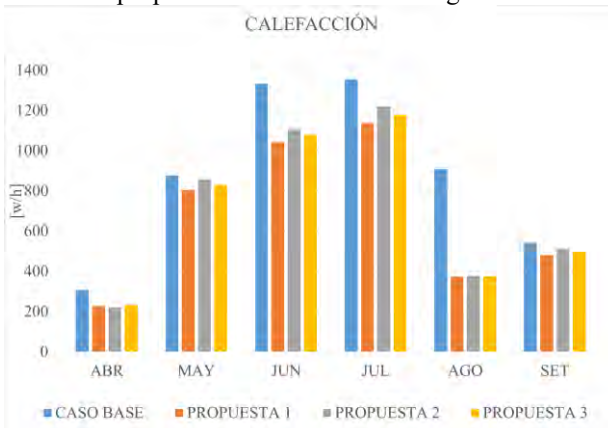


Figura 10. Carga para calefacción para invierno

La carga de calefacción anual para el caso base es de 5328 Wh si se instalara el equipo de aire acondicionado en la biblioteca con las características constructivas actuales. Las propuestas 2 y 3 arrojaron un consumo total de 4299 y 4192 Wh, respectivamente. Para la propuesta 1, que consiste en agregar aislación de poliestireno expandido de 0.03 m de espesor del lado interior del muro, se requeriría un consumo de 4069 Wh. Esto representa un ahorro del 24% en la carga térmica de calefacción.

Para los meses de verano, el requerimiento energético es significativamente menor con respecto al periodo analizado anteriormente. Para el caso base, la carga de refrigeración es de 161 Wh, en todo el periodo. Se observa un ahorro del 7 % para la propuesta 1, aunque resulta despreciable comparando con los consumos utilizados para calefacción.

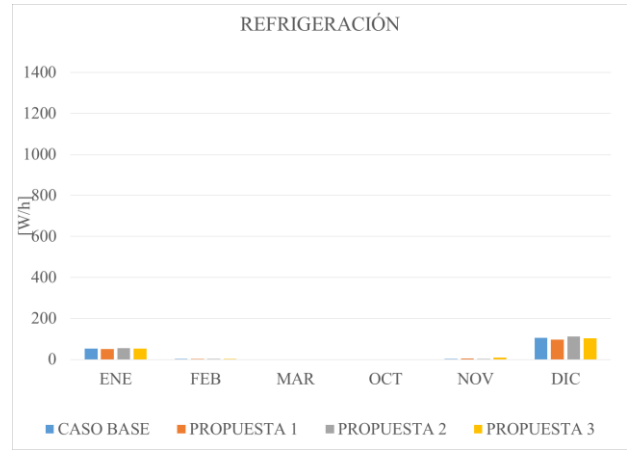


Figura 11. Carga de calefacción para verano

Se observa que el requerimiento para acondicionamiento de la biblioteca es principalmente de calefacción, coincidiendo con el periodo crítico evaluado en el monitoreo con temperaturas muy bajas y humedad relativa excesiva.

Se selecciona la propuesta 1 de inclusión de aislación del lado interior del muro porque, además de ser la opción más eficiente, es posible de realizar constructivamente teniendo en cuenta que se trata de un edificio patrimonial.

### 4. Conclusiones

El relevamiento higrotérmico realizado en el museo Pte. José E. Uriburu permitió concluir sobre algunos aspectos importantes, además de detectar salas de riesgo para la conservación de objetos patrimoniales. La baja amplitud de T y HR es en respuesta a la gran masividad del edificio. La humedad relativa promedio de la planta alta fue un 20% menor a la de la planta baja. Los ambientes de la planta baja tuvieron una HR mayor a la de la planta alta y a la HR exterior, la mayor parte del tiempo. Esto se debe a una posible fuente de humedad proveniente del suelo que asciende por capilaridad a través de pisos y muros.

Con la propuesta de un sistema activo de calefacción, se pretende reducir los niveles de HR al aumentar la T interior a los niveles recomendados por la normativa. Cabe destacar que la instalación de un equipo de aire acondicionado en un edificio con gran masa térmica conlleva gastos energéticos excesivos. Gracias a la simulación computacional realizada para la biblioteca se demuestra que mediante una intervención, de relativo bajo costo, se podrían obtener importantes ahorros energéticos.

Un ambiente interior estable es fundamental para la conservación del patrimonio albergado en los museos. Cuando se trata de objetos susceptibles a oscilaciones térmicas, como los archivos y documentos históricos, los daños son irreversibles cuando no se toman las medidas necesarias para su conservación.

Es importante el aspecto de la conservación tanto como el del confort de los usuarios porque para el caso puntual de la biblioteca del museo una persona permanece la jornada laboral completa. Existen otros casos en donde se puede *considerar despreciable el confort del usuario cuando la permanencia es por un tiempo reducido*, por ejemplo es el caso de las otras salas.

Para futuras intervenciones es importante tener en cuenta la tarea realizada. Muchos edificios patrimoniales de la ciudad (con el mismo comportamiento térmico), y probablemente de otros lugares cuyo clima e historia arquitectónica es similar, ya poseen instalados equipos de aire acondicionado con altos consumos energéticos. Este antecedente puede servir como una herramienta para el abordaje de la problemática.

Como trabajo futuro, se pretende extender la simulación computacional para todo el edificio y en ambos periodos del año. En el largo plazo se pretende desarrollar una metodología que permita realizar la evaluación del microclima, el análisis de cada variable medida y simulada y seleccionar las estrategias de rehabilitación energética más adecuadas para el tipo y uso de cada edificio.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por la Universidad Nacional de Salta (CIUNSa-A N°2489).

Se agradece especialmente al Director del Museo Pte. José E. Uriburu Arq. Mario Lazarovich, a la conservadora María Campero de Larrán, a la encargada de la Biblioteca Miguel Ángel Vergara y a todo el personal del Museo por su excelente predisposición y colaboración en los monitoreos y relevamiento del edificio.

## 6. Referencias bibliográficas

Bonora, A., Fabbri, K. y Pretelli, M. (2019). Environmental microclimate management and risk in the UNESCO world heritage site of Villa Barbaro Maser (Italy).

Camuffo D., Della Valle, A., Bertolin, C., Leorato, C. y Bristot A. Humidity and environmental diagnosis in Palazzo Grimani, Venice (2011). Indoor environment and preservation – climate control in museums and historic buildings (pp.45-50). Chapter: humidity and environmental diagnostics in Palazzo Grimani, Venice.

Corgnati, P. y Perino, M. (2006). A new approach for the IEQ (Indoor Environment Quality) assessment.

Coakley, D., Raftery, P. y Keane, M. A review of methods to match building energy simulation models to measured data. Renewable and sustainable energy reviews 37 (2014) 123– 141

Diulio, M., Mercader- Moyano, P. Y Gómez, A., (2019). The influence of the envelope in the preventive conservation of books and paper records. Case study: libraries and archives in La Plata, Argentina. *Energy & buildings*.

Ferdyn-Grygierek, J. (2016). Monitoring of indoor air parameters in large museum exhibition halls with and without air-conditioning systems. *Building and Environment*, 107, pp. 113–126, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.07.024>.

Federal energy management programs (FEMP). M&V guidelines: measurement and verification for performance-based contracts. V. 4.0, 2015

ISO 7730: 2005, International standard ISO environment-analytical determination (2005).

Muñoz, A. Validación y calibración de la simulación energética de edificios (2015). Curso académico del master en sostenibilidad. Universidad de las Palmas.

Pretelli, M. y Fabbri, K. (2013). Management indoor microclimate effect on heritage buildings: the case study of Malatestiana. *Built heritage 2013 monitoring conservation*

Silvera F., Rodrigues, F., Montelpare, S., Spacone, E. y Varum, H. (2018) Reabilitação energética de um edifício patrimonial do centro histórico de assunção. Conference: 6ª conferência sobre patologia e reabilitação de edifícios – patoreb 2018at: rio de janeiro, brazil.volume: <http://www.nppg.org.br/patorreb/files/artigos/80526.pdf>

Taylor, J (1997). An introduction to error analysis. Second edition. University science books. California

Thomson, G. The museum environment (1986). Butterworths, London.

UNI 10829 (1999). “Beni di interesse storico e artistico. Condizioni ambientali di conservazione. Misurazione ed analisi”. Ente nazionale italiano di unificazione.

Zamora, m., ó donell, m. Y ajmat, r. Development of a methodology for materials selection to control exhibition objects in house- museums. *International journal of conservation science*. [Http://ijcs.ro/](http://ijcs.ro/)

## Tratamento de dados climáticos de estação meteorológica para obtenção de TRY e dias típicos de projeto

Fabiane Aparecida Santana Oliveira<sup>1</sup>, Rovadavia Aline de Jesus Ribas<sup>1</sup>, Adriano Pinto Gomes<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil

<sup>2</sup>Instituto Federal de Minas Gerais, Ouro Preto, Brasil

### Resumo

Em simulações para avaliação do desempenho térmico de edificações situadas na cidade de Ouro Preto, MG, são utilizados dados climáticos de Belo Horizonte, que possui clima bastante distinto. Assim, o objetivo deste trabalho é tratar dados climáticos obtidos em uma estação meteorológica local, para determinar o ano climático de referência, ou, Test Reference Year (TRY) e dias típicos de projeto (verão e inverno). Como metodologia, baseia-se na reunião das médias mensais de Temperatura de Bulbo Seco (TBS) de dez anos consecutivos (2011-2020) e eliminado-se anos com extremos de temperatura até restar apenas um, considerado o TRY para a localidade. Para a obtenção dos dias típicos de verão e inverno aplica-se um tratamento estatístico baseado na frequência de ocorrência acumulada de dias do TRY que representam níveis de exigência na avaliação. O TRY determinado é 2014 e os dias típicos de verão são: 18 de dezembro para frequência de ocorrência (Fo) de 1%; 26 de dezembro para Fo de 2,5%; 27 de dezembro para Fo de 5%; 25 de dezembro para Fo de 10%. Os dias típicos de inverno são: 30 de julho para Fo de 1%; 11 de julho para Fo de 2,5% e 5%; 31 de julho para Fo de 10%.

### Introdução

Avaliar o desempenho térmico de uma edificação na fase de projeto, por meio de simulações computacionais, possibilita conhecer seu comportamento térmico e atuar buscando estratégias bioclimáticas eficientes de modo a proporcionar conforto ao usuário, com menos gasto de consumo energético. Para isso são necessários dados climáticos externos, que nem sempre estão disponíveis em sites oficiais.

Segundo Rossi, Dumke e Krüger (2009), o ideal seria obter dados o mais próximo possível do local onde se deseja construir. Porém, há um número reduzido de estações meteorológicas e muitas vezes elas estão distantes dos centros urbanos.

Para a avaliação de desempenho térmico de edificações situadas na cidade de Ouro Preto, MG, via simulação computacional, recorre-se a dados climáticos da capital do estado, Belo Horizonte, distante 96 km e situada na mesma zona bioclimática (ZB3), conforme recomendação da norma NBR 15220 (ABNT, 2005). No entanto esta cidade possui clima bem diferenciado de Ouro Preto, o que pode levar a resultados distantes da realidade.

Carlo e Lamberts (2005) ressaltam que o arquivo climático deve ser detalhado para atender adequadamente

o programa computacional, sendo necessário o registro horário de dados climáticos.

Um dos principais arquivos que pode ser aplicado para inserir informações climáticas em simulações é o que representa o Ano Climático de Referência, ou, Test Reference Year (TRY), que consiste de informações climáticas relativas a um ano sem extremos de temperatura. Esse arquivo é obtido, para um período mínimo de 10 anos de medições horárias, aplicando-se uma metodologia baseada na eliminação de anos, cujos dados contêm temperaturas médias mensais extremas (altas ou baixas), até que se obtenha apenas um ano de dados médios (GOULART; LAMBERTS; FIRMINO, 1997; SCHELLER et al, 2015).

Também, os dados climáticos podem ser inseridos na simulação numérica por meio de dias típicos (ou de projeto), que são caracterizados por sua frequência de ocorrência e representam as condições mais significativas ao longo do período de inverno e de verão (AKUTSU, 1998).

No Brasil, os arquivos TRY e outros arquivos climáticos aplicáveis nas simulações estão disponíveis apenas para algumas capitais e outras cidades, sem, contudo, abranger Ouro Preto, MG.

No entanto, no campus da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), tem-se uma estação meteorológica, que tem recolhido sistemática e regularmente os dados climáticos desde 2010, devendo esses dados receberem tratamento para serem inseridos em programas computacionais que simulam o desempenho térmico de edificações, citando-se o EnergyPlus. Obtém-se, assim, respostas mais condizentes com a realidade climática local.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é tratar dados climáticos obtidos em uma estação meteorológica situada na cidade de Ouro Preto, MG, definindo-se o ano climático de referência (TRY), bem como os dias típicos de inverno e de verão.

### Materiais e Métodos

#### Definição do TRY

A inserção em programas dos dados climáticos obtidos em medições requer um prévio tratamento estatístico ou método que torne prático o uso de uma grande quantidade de registros (SIQUEIRA et al. 2005). Uma estação meteorológica fornece vários parâmetros climáticos, que são, além da temperatura externa de bulbo seco (TBS), a umidade relativa do ar, pressão barométrica, bem como



velocidade e direção do vento, que ficam disponíveis para a configuração de um arquivo de clima do entorno.

Neste trabalho, para definir o TRY, aplica-se o método utilizado por autores citados por Ferraz e Oliveira (2020), como Leão (2007), Flores (2014), Rossi, Dumke e Krüger (2009) e Guimaraes (2016).

É feita, então, em planilhas eletrônicas do Excel, a disposição cronológica das temperaturas (TBS), do período entre 2011 e 2020, num total de dez vezes 8760 medições, determinando-se as médias mensais e, em seguida, a média das médias mensais.

Depois, identificam-se e classificam-se os meses mais quentes e mais frios, dispondo-se em sequência o 1º mês mais quente; depois o 1º mês mais frio equivalente ao 1º mês mais quente; depois o 2º mês mais quente e o 2º mês mais frio equivalente ao 2º mês mais quente; prosseguindo-se com esse procedimento até o décimo segundo mês mais frio contrapondo-se ao 12º mês mais quente. Resta-se, ao final da eliminação dos anos com extremos de temperatura, um ano representativo do clima local com características mais amenas em relação aos outros anos, tomado como TRY (LEÃO, 2007, apud FERRAZ; OLIVEIRA, 2020).

### Definição dos dias típicos de projeto

Para a caracterização dos dias típicos de projeto, de verão e inverno, é aplicado o método indicado por Akutsu (1998) e citado por Siqueira et al. (2005). São listadas as temperaturas máximas e mínimas de cada dia do ano climático de referência, determinando-se as médias das temperaturas máximas e mínimas para cada mês. Selecionam-se o mês mais quente, que é aquele que apresenta o maior valor para a média das temperaturas máximas diárias, e o mês mais frio, que é aquele que apresenta o menor valor para a média das temperaturas mínimas diárias.

O período de verão é composto pelo mês mais quente e pelos meses que apresentam no máximo uma diferença de  $\alpha$ °C para o mês mais quente. Determina-se o parâmetro  $\alpha$  para encontrar os outros meses, por meio da equação 1.

$$\alpha = 0,10 (T_{\max} - T_{\min}) \quad (1)$$

Sendo  $T_{\max}$  a média das temperaturas máximas diárias do mês mais quente e  $T_{\min}$  a média das temperaturas mínimas diárias do mês mais quente.

Aplica-se analogamente a equação (1) para encontrar o período de inverno, sendo  $T_{\max}$  a média das temperaturas máximas diárias do mês mais frio e  $T_{\min}$  a média das temperaturas mínimas diárias do mês mais frio.

Para o período de verão, calculam-se as temperaturas máximas diárias ( $TBS_{\max}$ ), equivalentes aos níveis de frequência de ocorrência acumulada (FOA), sendo esses valores identificados por  $TV_{N\%}$  (TV: temperatura de verão), para  $N = 1; 2,5; 5; e 10$ , observando-se que, para cada valor de  $N$ , tem-se  $N\%$  dos dias considerados com valores de  $TBS_{\max}$  maiores ou iguais a  $TV_{N\%}$ .

Para o período de inverno, o procedimento é similar, calculando-se as temperaturas mínimas diárias ( $TBS_{\min}$ ), equivalentes aos níveis de frequência de ocorrência acumulada, sendo esses valores identificados por  $TI_{N\%}$  (TI: temperatura de inverno), também para  $N = 1; 2,5; 5 e 10$ , observando-se que, para cada valor de  $N$ , tem-se  $N\%$  dos dias considerados com valores de  $TBS_{\min}$  menores ou iguais a  $TI_{N\%}$ .

Depois, para cada valor de frequência de ocorrência acumulada, obtêm-se os dias com temperaturas dentro dos intervalos aplicando a equação 2, para o período de verão, e a equação 3, para o período de inverno. O valor de  $\varepsilon$  define um intervalo em torno dos valores de  $TBS_{\max}$  e  $TBS_{\min}$  que indica a precisão requerida para a análise. Toma-se  $\varepsilon = 0,5$  °C como valor máximo.

$$TBS_{\max} = (TV_{N\%}) \pm \varepsilon \quad (2)$$

$$TBS_{\min} = (TI_{N\%}) \pm \varepsilon \quad (3)$$

Assim, é calculada a diferença entre o valor real e a média a cada hora, para cada frequência de ocorrência, que constitui o erro entre o valor real e a média. Eleva-se ao quadrado esses valores e faz-se sua soma, verificando-se que dia mostra o menor valor para esse somatório. A partir dos valores encontrados, buscam-se dias reais nas medições que se encontram dentro da variação requerida, sendo esses os dias típicos de projeto.

Na sequência, são reunidos os dados referentes aos dias típicos de verão e de inverno correspondentes a cada frequência. Depois, são anotados, além da temperatura de bulbo seco (TBS), outros parâmetros climáticos tais como a umidade relativa do ar (UR), pressão barométrica (PB), velocidade do vento (VV) e direção do vento (DV) para os dias típicos de verão e de inverno.

## Resultados

### Obtenção do TRY

Neste trabalho, são aplicados os dados climáticos recolhidos pelo período de dez anos consecutivos, na estação de medição situada no campus universitário da UFOP, em Ouro Preto, MG. Observam-se, no entanto, falhas nas medições, que são contornadas, adotando-se, na falta de medições horárias, a média entre as medições horárias anteriores e posteriores; e, na falta de medições diárias, a média entre as medições de dias anteriores e posteriores.

Adotando-se, assim, os procedimentos descritos em Materiais e Métodos: Definição do TRY, obtêm-se o ano de 2014 como representativo do clima local ou TRY. Na Tabela 1, mostram-se as médias mensais de TBS (°C), a cada ano, com os extremos de temperaturas mensais destacados. Nas células de cor rosa, tem-se, para cada mês do período considerado, as maiores médias de TBS (°C) e, nas células de cor azul, destacam-se, para cada mês, as maiores médias de TBS (°C). Na Figura 1, mostram-se em um gráfico os valores das TBS (°C) do TRY.

Tabela 1 – Médias mensais de TBS (°C) com extremos de temperatura mensais destacados

Ano	Jan	Feb	Mar	Abr	Mai	Jun
2011	19,13	20,16	19,25	18,53	15,84	14,78
2012	18,79	19,74	19,16	18,70	15,58	16,30
2013	19,57	20,37	17,35	17,24	16,28	16,20
2014	19,57	20,37	19,14	17,18	16,52	15,76
2015	19,73	20,41	19,82	18,25	16,77	15,56
2016	19,91	20,41	20,19	20,04	17,06	15,22
2017	20,76	19,67	19,59	18,19	16,17	15,80
2018	20,68	19,93	20,26	17,87	16,28	16,19
2019	21,64	21,09	20,12	19,69	18,14	16,12
2020	20,43	19,99	18,66	17,79	15,37	16,13
Ano	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2011	14,98	16,88	16,56	17,59	16,81	19,27
2012	15,61	15,01	17,53	19,49	18,43	21,32
2013	15,39	15,86	16,83	18,83	16,81	21,31
2014	14,79	15,82	17,78	18,23	18,77	20,09
2015	15,30	16,22	17,87	18,43	18,68	20,01
2016	15,79	16,75	17,92	18,65	18,61	20,04
2017	13,52	15,52	16,49	19,55	18,28	19,69
2018	15,75	15,73	17,41	18,85	20,50	19,68
2019	14,97	15,57	18,40	19,30	19,28	19,63
2020	16,07	15,22	19,59	19,02	18,76	19,82

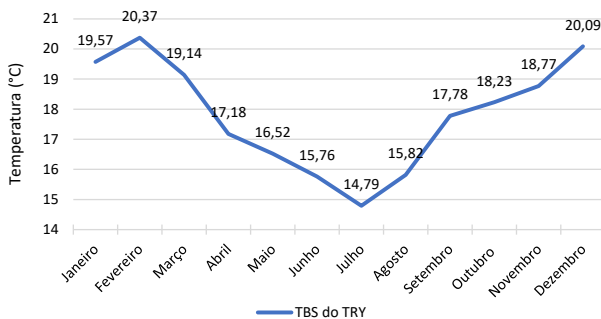


Figura 1: TBS (°C) do TRY.

### Obtenção dos dias típicos

Para a obtenção dos dias típicos de projeto, de verão e inverno, considerando o TRY, que o mês mais quente corresponde a Fevereiro e o mês mais frio, corresponde a Julho. Para o dia típico de verão, encontra-se  $\alpha$  igual a 0,748 e, assim, o período de verão fica composto por todos os meses com temperaturas médias de máxima iguais ou superiores a 23,99°C, o que corresponde a Fevereiro (24,73°C) e Dezembro (24,55°C). Tendo conhecimento dos meses que compõem o período de verão, listam-se os valores de temperaturas médias de máxima diárias. A partir disso, determinam-se os valores correspondentes à frequência de ocorrência acumulada para 1; 2,5; 5; e 10%. Em seguida, determina-se a variação requerida para cada frequência de ocorrência, para que se possa localizar dias reais que estejam adequados a essa variação. As variações encontradas são: 30,52 a 31,52°C para 1%; 29,36 a 30,36°C para 2,5%; 28,23 a 29,23°C para 5%; 26,49 a 27,49°C para 10%. Com isso, tem-se os seguintes dias reais: 18 de dezembro para 1%; 26 de dezembro para 2,5%; 27 de dezembro para 5%; 21 e 25 de dezembro para 10%. Como foram encontrados dois

dias para a frequência de 10% optou-se pelo dia de maior temperatura média das máximas diárias, dia 25 de dezembro.

Procede-se analogamente para encontrar o período de inverno, determinando-se  $\alpha$  igual a 0,645 e, com isso, o período de inverno fica composto por todos os meses com temperaturas médias iguais ou inferiores a 19,27°C, o que corresponde apenas a Julho (18,63°C). Para calcular os valores relativos à frequência de ocorrência acumulada, o diferencial em relação ao período de verão, é que são usados os valores das temperaturas médias de mínimas diárias. E as variações encontradas são: 7,9 a 8,9°C para 1%; 8,41 a 9,41°C para 2,5%; 9,19 a 10,19°C para 5%; 9,88 a 10,88°C para 10%. Com isso, tem-se os seguintes dias reais: 30 de julho para 1%; 11 de julho para 2,5%; 11 e 31 de julho para 5%; 10, 18, 20, 23, 29 e 31 de julho para 10%. Como encontram-se dois dias para a frequência de 5%, opta-se pelo de menor temperatura média das mínimas diárias, ou seja, o dia 11 de julho.

Mostram-se em gráficos, na Figura 2, as curvas de temperaturas de dias típicos de verão para frequências de ocorrência iguais a 1% e 10% e, na Figura 3, as curvas de temperatura de dias típicos de inverno para frequências de ocorrência iguais a 1% e 10%.

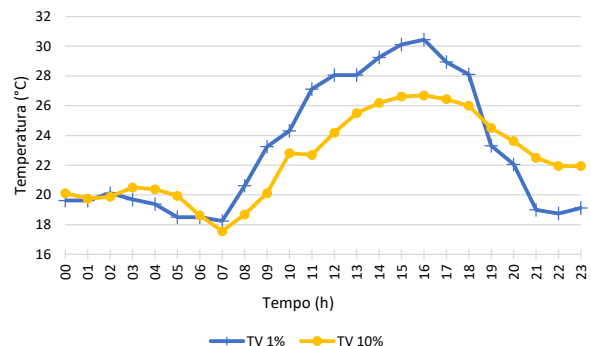


Figura 2: Temperaturas de dias típicos de verão para frequências de ocorrência iguais a 1% e 10%.

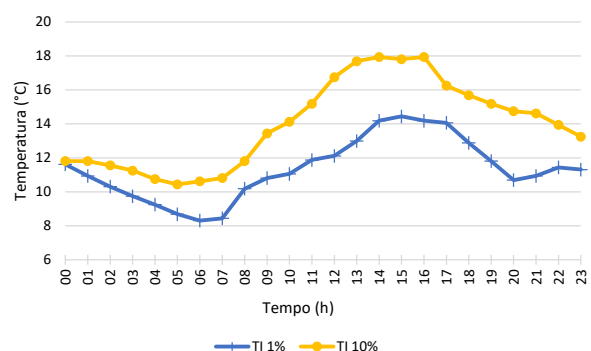


Figura 3: Temperaturas de dias típicos de inverno para frequências de ocorrência iguais a 1% e 10%.

### Conclusões

Neste trabalho, mostra-se uma metodologia para tratar dados climáticos medidos em uma estação meteorológica situada em Ouro Preto, MG, visando a obtenção do ano

climático de referência (TRY), a partir do qual pode-se elaborar o arquivo de extensão .try, de formato apropriado para ser utilizado em programas para avaliação de desempenho térmico de edificações. São obtidos também os dias típicos de projeto de verão e inverno.

A partir dessa caracterização, os dados encontrados tornam-se aplicáveis a simulações computacionais, que serão mais condizentes com o clima da cidade, permitindo resultados mais próximos da realidade local.

## Agradecimento

Os autores agradecem a Universidade Federal de Ouro Preto.

## Referências

- Akutsu, M. (1998). Métodos para avaliação do desempenho térmico de edificações no Brasil. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005). NBR 15220: Desempenho térmico de edificações. ABNT, Rio de Janeiro.
- Carlo, J. C.; Lamberts, R. (2005). Processamento de arquivos climáticos para simulação do desempenho energético de edificações. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações – LabEEE, Florianópolis.
- Ferraz, A. M. M.; Oliveira, M. C. A. (2020). Definição do ano climático de referência (TRY) para a cidade de Palmas- Tocantins. *Revista Desafios* 7(2), 70–79. DOI: <http://dx.doi.org/10.20873/uftv7-7472>.
- Flores, M. G. (2014). Geração da base climática de Santa Maria – RS - para análise de desempenho térmico e eficiência energética em edificações. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- Goulart, S.; Lamberts, R.; Firmino, S. (1997). Dados climáticos para projeto e avaliação energética de edificações para 14 cidades brasileiras. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Guimarães, I. B. B. (2016). Análises de incertezas e sensibilidade de arquivos climáticos e seus impactos em simulações computacionais termo energéticas. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- Leão, E. F. T. B. (2007). Carta bioclimática de Cuiabá – Mato Grosso, Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá.
- Rossi, F. A.; Dumke, E.; Krüger, E. (2009). Atualização do Ano Climático de Referência para Curitiba. Anais do X Encontro Nacional e VI Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído. Natal, 199–207.
- Scheller, C.; Melo, A. P.; Sorgato, M.; Lamberts, R. (2015). Análise de arquivos climáticos para a simulação do desempenho energético de edificações. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações – LabEEE, Florianópolis.
- Siqueira, T. C. P. A.; Akutsu, M.; Lopes, J. I. E.; Souza, H. A. (2005). Dados climáticos para avaliação de desempenho térmico de edificações. *REM: Revista da Escola de Minas*, Ouro Preto, 58(2), 133–138.

## Avaliação do desempenho térmico de salas de aulas do INVERSU considerando estratégias bioclimáticas

Nathalia de La Silva Gomes<sup>1</sup>, Rovadavia Aline de Jesus Ribas<sup>1</sup>, Adriano Pinto Gomes<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil

<sup>2</sup>Instituto Federal de Minas Gerais, Ouro Preto, Brasil

### Resumo

O Instituto Verde de Sustentabilidade do Quadrilátero Ferrífero (INVERSU) objetiva promover cursos e contribuir para o desenvolvimento cultural, econômico e ambiental sustentável da região de Ouro Preto, MG. Em seu projeto arquitetônico, constam biblioteca, local de eventos, administração, salas de aulas e oficinas, adotando o sistema estrutural em aço e vidro nas fachadas. Para melhorar o conforto ambiental no interior das edificações, está prevista a aplicação de filme fotovoltaico orgânico (OPV) e de fachada ventilada de placas pré-fabricadas de cimento geopolimérico, no sistema de fechamento vertical externo, além de brises horizontais e telhado verde. O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho térmico do sistema de fechamento do bloco de salas de aulas do INVERSU, por simulação computacional, utilizando o software EnergyPlus. Os resultados apontam que estratégias bioclimáticas proporcionam climas internos mais amenos, evitando gasto excessivo com energia e atendendo a filosofia de sustentabilidade do Instituto.

### Introdução

Um projeto arquitetônico eficiente tende a oferecer uma edificação que proporcione um ambiente interno confortável ao seu usuário. Se a edificação não contribui para isso, ela influencia diretamente no consumo energético dos moradores, que necessitam tomar medidas para tornar os ambientes mais confortáveis (ROAF; CRICHTON; NICOL, 2009).

Baixos índices de conforto térmico podem resultar rendimentos inferiores no trabalho, além de problemas físicos como desconforto muscular, dor de cabeça e cansaço. Entretanto, quando o local é bem climatizado, a predisposição para a realização de tarefas se torna mais satisfatória (SILVA, 2015).

O conforto térmico está relacionado ao desempenho térmico da edificação e a escolha do fechamento constitui uma etapa importante do projeto para se obterem melhores índices de desempenho térmico. É por meio de uma escolha adequada, considerando o clima local e disponibilidade de material, que se pode projetar verificando-se se os usuários terão que fazer uso por mais tempo de ar condicionado no verão ou de aquecedor no inverno, elevando o consumo de energia elétrica (FARIA, 2013).

Dessa forma, o estudo do desempenho térmico de edificações com ventilação natural tem se tornado relevante, em busca de projetos que apresentem grande

potencial de utilização racional da energia elétrica. (BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2010).

O Instituto Verde de Sustentabilidade do Quadrilátero Ferrífero (INVERSU), idealizado por Araújo (2019), tem por objetivo promover cursos no intuito de contribuir para o desenvolvimento cultural, econômico e ambiental sustentável da região. No espaço reservado a ele está prevista a construção de quatro blocos paralelos de edificações, sendo uma biblioteca, um espaço para eventos, um bloco de atividades administrativas, um bloco de salas de aulas e de professores, bem como um galpão para atividades manuais, como marcenaria e prototipagem (Figura 1).



Figura 1: Vista aérea do INVERSU

O projeto arquitetônico de seu complexo é voltado para a sustentabilidade e eficiência energética, em que são previstas estratégias que imprimirão à sua construção um caráter sustentável e contribuirão para a eficiência energética de suas edificações. Dentre esses recursos, destaca-se a estrutura em aço, que é reciclável, podendo ser desmontada e reaproveitada em outro local. Para o sistema de fechamento vertical externo, prevê-se o uso de vidro revestido parcialmente com filme fotovoltaico orgânico (OPV), nas fachadas norte e sul, destacando-se que o OPV é fabricado a partir de material orgânico não tóxico em processo de baixa demanda energética e poderá promover redução da temperatura no interior dos edifícios bloqueando radiações infravermelha e ultravioleta. Também são previstas fachadas ventiladas a leste e a oeste, constituídas externamente por cimento geopolimérico composto por material de rejeito de

barragem de minério de ferro da região, que também podem reduzir as temperaturas no interior e proporcionar uma redução do consumo de energia. Outras estratégias bioclimáticas, que visam melhorar o clima na edificação, são a aplicação de brises horizontais no terraço, que contribuirão para sombrear os edifícios e suportar placas fotovoltaicas na cobertura para geração de energia; e cobertura composta por telhados verdes, que tendem a contribuir tanto para o conforto térmico, quanto para o conforto acústico e para a captação de águas pluviais para reaproveitamento. Para fechamento interno, está previsto o uso de gesso acartonado, que é um material mais leve do que fechamentos convencionais de tijolo cerâmico, por exemplo, e aliviam a carga na estrutura e nas fundações.

Nesse contexto, o objetivo desta pesquisa é realizar uma avaliação do desempenho térmico do sistema de fechamento proposto para o edifício que abrigará salas de aulas do Instituto Verde de Sustentabilidade do Quadrilátero Ferrífero (INVERSU).

## Materiais e Métodos

### Critérios para a avaliação do desempenho térmico

A avaliação do desempenho térmico é feita conforme o critério mínimo de desempenho térmico da norma NBR 15575 (ABNT, 2013) e o intervalo de temperatura de conforto da norma ASHRAE 55 (ASHRAE, 2017). Embora a norma NBR 15575 (ABNT, 2013) seja direcionada a edificações habitacionais, ela é utilizada como referência, pois aborda a avaliação de desempenho térmico em ambientes de longa permanência, considerando-se esse o caso de salas de aulas. Também, essa norma foi corrigida em 2021, mas esta pesquisa foi elaborada antes de sua atualização e não se notam conflitos, posto que são avaliados os sistemas de fechamento da edificação em análises paramétricas.

Na Tabela 1, são mostrados os critérios de avaliação, estabelecidos pela norma NBR 15220 (ABNT, 2005), para o nível mínimo de desempenho térmico de edificações, segundo a norma NBR 15575 (ABNT, 2013), para dias típicos de verão e de inverno, para a zona bioclimática 3 (ZB3), considerada neste estudo, sendo  $T_{i,max}$  o valor máximo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em °C;  $T_{e,max}$  o valor máximo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em °C;  $T_{i,min}$  o valor mínimo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em °C;  $T_{e,min}$  o valor mínimo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em °C.

Tabela 1. Critérios de avaliação para o nível mínimo de desempenho térmico

ZB3	Situação de verão	Situação de inverno
Nível mínimo de desempenho	$T_{i,max} \leq T_{e,max}$	$T_{i,min} \geq (T_{e,min} + 3 \text{ } ^\circ\text{C})$

A norma ASHRAE 55 (ASHRAE, 2017) apresenta uma proposta de modelo de conforto adaptativo para avaliação do conforto térmico em ambientes naturalmente ventilados, que consiste na determinação da temperatura

operativa interna, temperatura de conforto ou temperatura neutra ( $T_n$ ), a partir da temperatura externa, comparando-a com a temperatura operativa interna real ( $T_o$ ), para verificar a condição de conforto dos ambientes (GONÇALVES, 2018 apud OLIVEIRA, 2019).

A temperatura operativa ( $T_n$ ) é definida, segundo McCartney e Nicol (2002 apud OLIVEIRA, 2019), como sendo a temperatura que uma pessoa adota como confortável definindo-se os limites máximo e mínimo do intervalo de conforto que garantem a aceitabilidade das condições térmicas para 80% dos usuários satisfeitos, calculados pelas equações 1 e 2 (ASHRAE, 2017).

$$T_{n\_ls80} = 0,31 \times T_e + 21,3 \quad (1)$$

$$T_{n\_li80} = 0,31 \times T_e + 14,3 \quad (2)$$

Sendo  $T_{n\_ls80}$  o limite superior do intervalo de conforto com 80% de ocupantes satisfeitos;  $T_{n\_li80}$  o limite inferior do intervalo de conforto com 80% de ocupantes satisfeitos.

### Dados para as simulações

As simulações são realizadas por meio do software EnergyPlus versão 9.4.0 (DOE, 2020a), aplicando-se o sistema de fechamento previsto em projeto arquitetônico, com as estratégias bioclimáticas propostas, bem como dados de temperatura e umidade do clima da cidade de Belo Horizonte localizada na ZB3, disponibilizados no site do EnergyPlus (DOE, 2020b), seguindo recomendação da norma NBR 15575 (ABNT, 2013). Na Tabela 2, são mostrados dados de localização geográfica e nas Tabelas 3 e 4, apresentam-se os dados dos dias típicos de verão e inverno para essa cidade (ABNT, 2013; DOE, 2020b).

Tabela 2: Localização geográfica de Belo Horizonte, MG

Zona Bioclimática	Latitude	Longitude	Altitude [m]
ZB3	19,93S	43,93W	850

Tabela 3: Dados dos dias típicos de Belo Horizonte, MG

Parâmetro	Dia típico de verão	Dia típico de inverno
Dia/mês	20/02	24/06
Temper. máx. diária (°C)	32	---
Temper. mín. diária (°C)	---	8,7
Amplitude diária temper. (°C)	10,3	12,6
Temper. bulbo úmido (°C)	21,7	16,0
Pressão atmosférica (Pa)	92806	92782
Velocidade do vento (m/s)	1,97	0
Direção do vento (N=0)	50	0

O algoritmo de solução do balanço de calor aplicado é o *ConductionTransferFunction* (CTF), que considera apenas o calor sensível. Para cálculo do coeficiente de convecção em superfícies, adota-se o algoritmo “Simple” para a face interna e “SimpleCombined” para a face externa de todas as superfícies de transferência de calor no modelo (DOE, 2020c).

A simulação computacional é realizada para todo o edifício do bloco de salas de aulas, constituído pelo pilotis (térreo), pavimento multiuso, pavimento de salas de aulas e cobertura verde (Figura 2). A área de cada pavimento é igual a 51,33 m x 12,19 m. São seis salas de aulas, sendo três voltadas para o norte e três para o sul e cada uma representa uma zona térmica (Figura 3). As áreas envidraçadas dessas salas, cujas dimensões são mostradas na Figura 4, ocupam quase a totalidade da superfície.

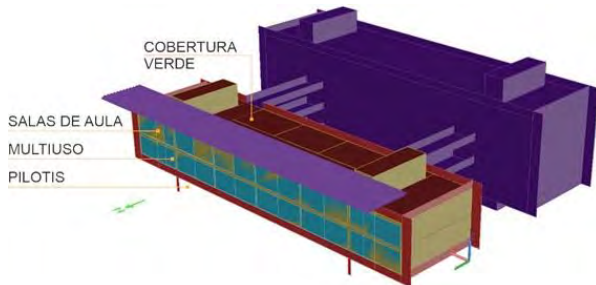


Figura 2: Geometria do bloco de salas de aulas.



1: depósitos; 2: banheiros; 3: escadas e elevadores; 4: circulação; 5: escritórios; 6 - 11: salas de aulas.

Figura 3: Planta baixa do bloco de salas de aulas.

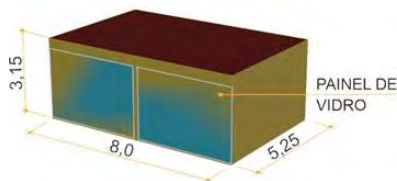


Figura 4: Dimensões das salas de aulas (m).

No pavimento multiuso, a área de circulação vertical é modelada como duas zonas térmicas e o restante da área útil do pavimento é representado por uma única zona térmica, sem divisões internas, simplificando a modelagem geométrica. A edificação vizinha e as passarelas, que obstruem a radiação solar direta na fachada sul, são modeladas como placas de sombreamento com transmitância igual a zero (Figura 5).

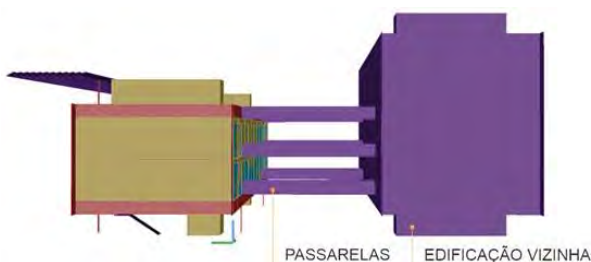


Figura 5: Elementos de obstrução solar

Os brises que estão sobre a cobertura e se projetam na fachada norte são representados apenas sobre a fachada norte (Figura 6). Isso porque, eles iriam diminuir a influência da cobertura verde no desempenho térmico da edificação, comprometendo a análise dessa estratégia.

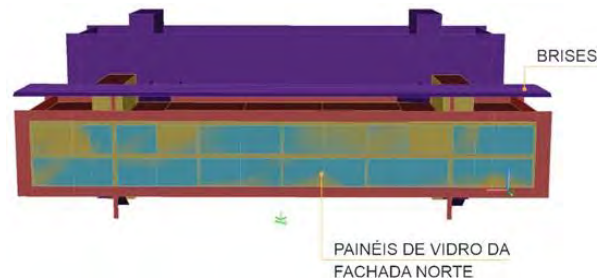


Figura 6: Brises na fachada norte.

O sistema de fechamento da edificação possui a composição relacionada a seguir e as propriedades termofísicas dos materiais utilizados em sua composição são apresentadas na Tabela 4 (ABNT, 2005; CLARKE, 1985).

- i) Fechamentos externos: nas fachadas norte e sul o fechamento é constituído de painéis de vidro temperado incolor de 6 mm;
- ii) Paredes internas: são constituídas de sistema Drywall, com uma chapa de gesso acartonado Standard em cada face e montante de 90 mm em aço galvanizado, com espessura total de 11,5 cm;
- iii) Paredes da caixa de escada e do elevador: de concreto armado com espessura de 20 cm;
- iv) Lajes entrepisos: em Steel Deck, com 120 mm de altura total de concreto (50 mm da telha-fôrma e 70 mm de concreto) e com a telha-fôrma de espessura de 0,80 mm;
- v) Portas: compostas por duas lâminas de compensado e camada de ar interna.

Tabela 4: Propriedades termofísicas dos materiais dos fechamentos

Material	Espes-sura (m)	Propriedades Termofísicas			
		$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/m.K]	$c$ [J/kg.K]	$R$ [m <sup>2</sup> .K/W]
Chapa de gesso acartonado	0,0125	750	0,35	840	---
Concreto das paredes	0,20	2400	1,75	1000	---
Telha forma de aço zincado	0,0008	7800	55	460	---
Concreto lajes entrepisos	0,07	2400	1,75	1000	---
piso cerâmico	0,012	1900	0,85	837	---
Compensado	0,005	550	0,15	2300	---
Camada de ar da porta	0,02	---	---	---	0,14

## Resultados

As simulações para a análise de desempenho térmico são realizadas considerando-se primeiramente a edificação

com todas as estratégias previstas em projeto. Depois, são retiradas as estratégias uma a uma, simulando-se a edificação sem OPV, em seguida sem fachada ventilada, depois sem brises, depois sem cobertura verde e por último sem todas as estratégias.

As zonas térmicas correspondentes às salas de aulas são as de números 6 a 11 (Figura 3). Como parte dos resultados obtidos, são mostrados gráficos da temperatura no interior das salas de aulas 7, cuja fachada está voltada para norte, e 10, cuja fachada está voltada para sul, para a taxa de ventilação igual a 5 ren/h. Nas legendas dos gráficos, são adotadas as siglas citadas na sequência, conforme as estratégias bioclimáticas que constam no projeto arquitetônico e consideradas nas simulações:

CTES – com todas as estratégias;  
 SOPV – sem OPV;  
 SFVE – sem fachada ventilada;  
 SBRI – sem brises;  
 SCVD – sem cobertura verde;  
 STES – sem todas as estratégias;  
 SOBS – sem obstrução;  
 Text – temperatura externa.

Nos gráficos, são marcadas as faixas de temperaturas de conforto, calculadas segundo as equações 1 e 2, observando-se o intervalo de temperatura de conforto para 80% dos usuários satisfeitos, que são, para verão, entre 25,5°C e 29,5°C, e, para inverno, entre 18,8°C e 25,8°C.

#### Para a condição de verão

São mostradas, nas Figuras 7 e 8, as temperaturas internas obtidas para as salas 7 (norte) e 10 (sul), respectivamente, e a temperatura externa, para a condição de verão.

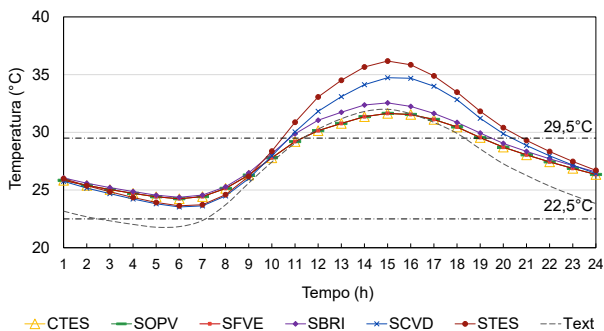


Figura 7: Temperatura interna – verão – Sala 7.

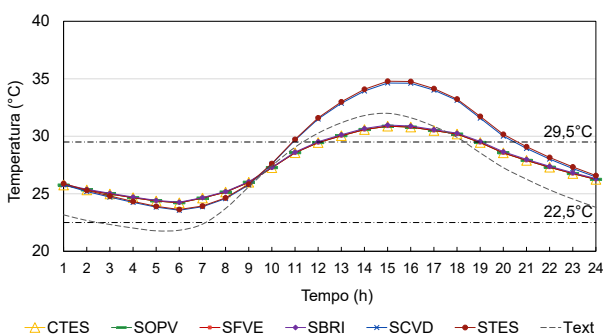


Figura 8: Temperatura interna – verão – Sala 10.

Analisando os resultados, para a condição de verão, a temperatura externa máxima é igual a 32°C às 15h (Figuras 7 e 8). Conforme a Figura 7, na sala de aula 7 (norte), o critério mínimo de desempenho térmico no verão, segundo a norma NBR 15575 (ABNT, 2013), em que  $T_{i,max} < T_{e,max}$ , está atendido quando todas as estratégias (CTES) são adotadas, ou quando é retirado o OPV (SOPV) ou a fachada ventilada (SFVE). No entanto, quando se retiram os brises (SBRI), ou fachada verde (SFVD), ou todas as estratégias (STES), o critério de desempenho térmico não é atendido.

Conforme a Figura 8, na sala de aula 10 (sul), esse critério mínimo de desempenho térmico no verão está atendido quando todas as estratégias (CTES) são adotadas, ou quando é retirado o OPV (SOPV), ou a fachada ventilada (SFVE), ou os brises (SBRI). No entanto, quando se retira a fachada verde (SFVD), ou todas as estratégias (STES), o critério de desempenho térmico não é atendido.

Avaliando o conforto térmico segundo a norma ASHRAE 55 (ASHRAE, 2017), em todas as situações ou mesmo adotando-se todas as estratégias (CTES), há um período de horas de desconforto, nas salas de aulas avaliadas, pois nas horas mais quentes do dia, entre 11h e 18h, em que a temperatura externa supera a temperatura limite para o conforto térmico (29,5°C), a temperatura interna também supera esse valor (Figuras 7 e 8).

Para a sala de aula 7 (norte), há uma alteração no horário de desconforto, que vai das 11h às 19h, quando são adotadas todas as estratégias (CTES), ou quando é retirado o OPV (SOPV), ou a fachada ventilada (SFVE), ou os brises (SBRI). Quando se retira a fachada verde (SFVD), ou todas as estratégias (STES), o horário de desconforto vai das 10h às 20h (Figura 7).

Para a sala de aula 10 (sul), o horário de desconforto vai das 12h às 19h, quando são adotadas todas as estratégias (CTES) e também quando é retirado o OPV (SOPV), ou a fachada ventilada (SFVE) ou os brises (SBRI). Quando se retira a fachada verde (SFVD), ou todas as estratégias, o horário de desconforto vai das 11h às 20h30 (Figura 8).

#### Para a condição de inverno

São mostradas, nas Figuras 9 e 10, as temperaturas internas obtidas para as salas 7 (norte) e 10 (sul), respectivamente, e a temperatura externa, para a condição de inverno.

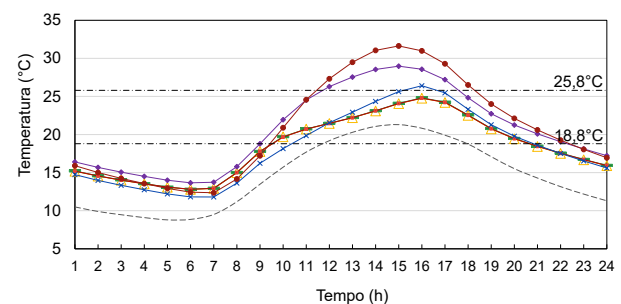
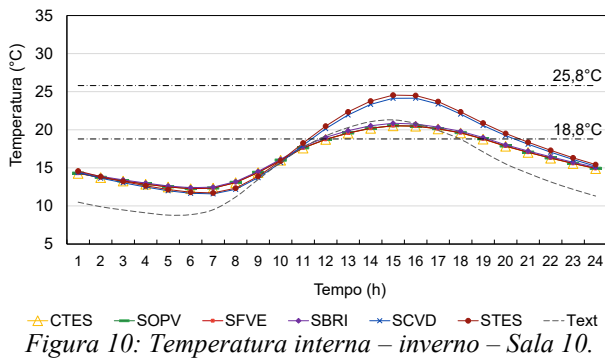


Figura 9: Temperatura interna – inverno – Sala 7.



Analisando os resultados, para a condição de inverno, a temperatura externa máxima é igual a 21,3°C às 15h, na condição de inverno (Figuras 9 e 10). Avalia-se apenas a faixa de conforto térmico segundo a norma ASHRAE 55 (ASHRAE, 2017). Isso porque, para analisar o critério mínimo de desempenho térmico, conforme a norma NBR 15575 (ABNT, 2013), em que  $T_{i,min} \geq (T_{e,min} + 3 \text{ } ^\circ\text{C})$ , tem-se que a temperatura interna mínima, que é igual a 8,8°C, ocorre às 5h. Portanto, não se considera condizente avaliar o desempenho térmico das salas de aulas nesse horário, por se tratar de uma escola, em que a maior movimentação de pessoas ocorre, normalmente, durante o dia.

Assim, quando são consideradas todas as estratégias (CTES), há um período de horas de desconforto, na sala 7 (norte), quando são retirados os brises (SBRI), ou todas as estratégias (STES), entre 12h e 18h, aproximadamente. Quando se retira somente a cobertura verde (SCVD), as horas de desconforto passam a ser das 15h às 16h30. E, quando são consideradas todas as estratégias (CTES), ou se retira o OPV (SOPV), ou a fachada ventilada (SFVE), não há horas de desconforto, no período entre 10h e 21h, aproximadamente, sendo que, antes e após esses horários, a temperatura interna tende a ficar abaixo de 18,8°C, limite mínimo de conforto térmico (Figura 9).

Para a sala de aula 10 (sul), em todas as situações, não há horas de desconforto, no período entre 10h e 20h, aproximadamente, sendo, que antes e após esses horários, a temperatura interna tende a ficar abaixo de 18,8°C, limite mínimo de conforto térmico (Figura 10).

## Conclusões

Os estudos realizados neste trabalho, de análise de desempenho térmico das salas de aulas de uma edificação em fase de projeto, estruturada em aço e com sistema de fechamento externo em vidro, apontam que estratégias adotadas para melhorar o clima em seu interior se apresentam mais eficientes, proporcionando climas internos mais amenos e confortáveis aos usuários, diminuindo, assim, despesas com energia.

As estratégias adotadas, que são vidro revestido parcialmente com filme OPV, para fechamento externo, fachada ventilada construída a partir de placas pré-fabricadas de cimento geopolimérico, aplicação de brises horizontais e de telhado verde, produzem, para a condição

de verão, o atendimento ao critério mínimo de desempenho da norma NBR 15575 (ABNT, 2013). Retirando-se as estratégias, o critério mínimo da norma não é atendido.

Avaliando segundo a norma ASHRAE 55 (ASHRAE, 2017), conforme a faixa de conforto térmico, notam-se horas de desconforto, na condição de verão, mesmo aplicando-se todas as estratégias previstas. Sem as estratégias há ainda mais tempo de desconforto e temperaturas mais elevadas no interior das salas de aulas da edificação. Na condição de inverno, nas salas de aulas voltadas para norte, não há horas de desconforto térmico devidas ao calor quando se aplicam todas as estratégias. E, nas salas voltadas para sul, não há horas de desconforto térmico devido ao calor com ou sem as estratégias.

Excluindo o OPV ou a fachada ventilada, não se observa alteração das temperaturas internas, comparando-se com a situação quando se consideram todas as estratégias, mostrando que esses dois elementos, da forma como estão previstos em projeto, não influenciam no desempenho térmico das salas avaliadas. Quando se retiram os brises horizontais e o telhado verde, em geral, ocorre uma elevação das temperaturas no interior das salas avaliadas, mostrando sua efetividade enquanto estratégias bioclimáticas.

De forma geral, na edificação, constatam-se horas de desconforto térmico tanto no verão, com horas de temperaturas mais elevadas, quanto no inverno, com horas de temperaturas mais baixas. E as estratégias relativas à aplicação dos brises horizontais e do telhado verde se mostram eficazes, amenizando o clima no interior das salas de aulas nas duas estações.

## Agradecimento

Os autores agradecem a Universidade Federal de Ouro Preto.

## Referências

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005). NBR 15220: Desempenho térmico de edificações. ABNT, Rio de Janeiro.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013). NBR 15575: Edifícios habitacionais – Desempenho. ABNT, Rio de Janeiro.
- Araújo, E. C. (2020). Instituto Verde de Sustentabilidade do Quadrilátero Ferrífero (INVERSU). Vídeo institucional. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=oiiO0VgXEaU&t=16s>>. Acesso em: 15 mai. 2021.
- ASHRAE – American National Standards Institute / American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (2017). ANSI/ASHRAE 55-2017: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta.
- Bittencourt, L.; Cândido, C. (2010). Ventilação natural em edificações. PROCEL EDIFICA. Rio de Janeiro.



- Clarke, J. A. (1985). *Energy Simulation in Building Design*. Boston, USA. Adan Hilger Ltd.
- DOE – U. S. Department of Energy (2020a). *EnergyPlus Version 9.4.0*. Disponível em: <https://energyplus.net/downloads>. Acesso em: 12 out. 2020.
- DOE – U. S. Department of Energy (2020b). *Weather Data*. Disponível em: <https://energyplus.net/weather>. Acesso em: 12 nov. 2020.
- DOE – U. S. Department of Energy (2020c). *EnergyPlus Version 9.4.0 Documentation: Input Output Reference*.
- Faria, M. A. (2013) *Avaliação das condições de conforto térmico nas salas de aula do Campus Morro do Cruzeiro da UFOP*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- Oliveira, G. G. (2019). *Avaliação do desempenho térmico de sistemas de fechamento interno e externo em uma edificação estruturada em aço*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- Roaf, S.; Crichton D.; Nicol F. (2009). *Adapting Buildings and Cities for Climate Change – A 21st Century Survival Guide*. Second Edition. Architectural Press, New York
- Silva, N. L. (2015). *Análise dos Parâmetros de Conforto Térmico em Habitações Populares de um Conjunto em João Pessoa/PB*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.

## Desenvolvimento de arquétipo de edifício de escritórios com ventilação híbrida: abordagem metodológica para desenvolvimento de modelo

Ana Carolina de Oliveira Veloso<sup>1</sup>, Charles Rodrigues Andrade Filho<sup>1</sup>,  
Roberta Vieira Gonçalves de Souza<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil

### Resumo

Com o aumento da relevância dada às preocupações com as questões ambientais e a eficiência energética, a ventilação natural aliada a um modo híbrido de sistemas de condicionamento de ar mostra-se como uma alternativa para diminuir o consumo de energia dos edifícios. Sendo assim, este trabalho estimou as variáveis arquitetônicas para o desenvolvimento de arquétipo da tipologia de edifícios de escritórios com sistema de condicionamento híbrido e comparou o consumo de energia estimado com *benchmarking* de energia local. Considera-se que o arquétipo desenvolvido pode ser aplicado em outras localidades com contextos climáticos semelhantes, possibilitando a análise dessas edificações na redução do consumo de energia.

### Introdução

As edificações tornaram foco das atenções nas últimas décadas pois elas podem contribuir com o uso racional de energia (Zou et al, 2018). Elas são responsáveis por uma parcela significativa do consumo de energia elétrica no Brasil e no mundo, sendo assim, estima-se que haja grande potencial de mitigação de consumo neste setor. No Brasil, a matriz das edificações está bastante ligada ao uso de energia elétrica (BEN, 2021) e os edifícios de escritório correspondem a 13,1% deste consumo.

A implantação de estratégias de eficiência energética nos edifícios não só reduz o pico de demanda de energia, como também reduz o uso de energia em geral e o seu impacto no meio ambiente (Kneifel, 2010; Nikolau et al, 2015). O princípio básico para melhorar a eficiência energética de um edifício é usar menos energia para aquecimento, arrefecimento e iluminação, sem afetar a saúde e conforto dos seus ocupantes (Kolokotsa, Nikolau, Stravrakakis, 2011; Perez-Lombard et al, 2009).

Considera-se que a avaliação do uso de energia em edifícios é essencial, uma vez que estes contribuem significativamente na demanda de energia (Gerald, Ghisi, 2020), mas que o comportamento energético dos edifícios é algo complexo e difícil de prever pois este é influenciado por diversos fatores, como condições climáticas, propriedades térmicas dos materiais utilizados, comportamento dos usuários, rotina de uso, equipamentos instalados, etc (Zhao, Magoules, 2012, Arjunan et al, 2022).

Conhecer os padrões de consumo dos edifícios irá permitir encontrar possibilidades de aumento de eficiência energética sendo a estimativa do consumo de energia do edifício a ferramenta chave para reduzir tanto o seu consumo de energia quanto as emissões de gases de efeito estufa. (Alves et al, 2018; Gnecco et al, 2022). Sendo assim, o desenvolvimento de arquétipos para prever o consumo de energia nos edifícios é essencial em diferentes aplicações, tais como a gestão da energia dos edifícios e o estabelecimento de consumo base de uma determinada tipologia de edifício (Asadi et al, 2014).

Os arquétipos de edifícios são modelos capazes de representar uma tipologia com características, comportamentos, usos e função “típicas”. Os arquétipos tem sido utilizados para estudar a intensidade de uso de energia tanto das edificações quanto na escala urbana (Bucley et al., 2021). A modelagem de estoque baseada em arquétipo é uma ferramenta adequada para se explorar cenários de medidas de *retrofit*. Esta modelagem é criada por uma combinação de características encontradas dentro de uma categoria de construções com atributos semelhantes (Monteiro et al, 2015). Diferentes arquétipos podem ser simulados em um contexto específico de clima e os resultados de consumo de energia podem ser extrapolados para todo o parque edificado (Leroy, 2022).

Para comparar o desempenho calculado ou medido de um edifício é necessário que hajam valores de referência similares (Borgstein et al., 2016; Park et al., 2016). Para isso, o *benchmarking* é uma estratégia usada para determinar a eficiência da edificação em relação aos edifícios do estoque correspondente (de Wilde, 2018), sendo um indicador de desempenho energético o Energy Use Intensity (EUI) definido como o consumo de energia normalizado por área útil, ou seja, kWh/m<sup>2</sup>.ano.

A partir do conhecimento do uso de energia em uma edificação e da colocação de metas de consumo a partir da comparação deste com um determinado *benchmarking*, em geral, é possível conseguir alcançar uma redução do consumo de energia investindo em tecnologias ou entendendo o comportamento dos usuários. A atualização de tecnologia leva tempo e grandes investimentos, já a capacidade humana de se adaptar pode ter um retorno mais rápido; ambos que resultando em redução no consumo de energia (Harputlugil, de Wilde, 2021).

Em climas temperados amenos, o uso de ventilação natural pode ser um fator significativo na redução do consumo de energia (Veloso, Souza e Santos, 2020) e no

Brasil, quase 30% da população vive em cidades cujo clima é considerado como temperado ameno. Sendo assim, considera-se importante estudar melhor o consumo de energia em edificações neste clima.

O objetivo desse artigo é então apresentar o desenvolvimento de arquétipo representativo da tipologia de edifícios de escritório com sistema híbrido de ventilação a partir de levantamento de dados de projeto e obtidos *in loco* ou por ferramentas de levantamento online e comparar o consumo de energia obtido por este arquétipo com um benchmarking local, tomando como estudo de caso edifícios da cidade de Belo Horizonte.

## Metodologia

Este artigo apresenta o desenvolvimento de arquétipos dos edifícios de escritório com ventilação híbrida feito dentro de um projeto maior de avaliação desta tipologia financiado pela FAPEMIG. Para esse desenvolvimento, a coleta de dados foi a etapa mais decisiva, pois a etapa na qual foram extraídas as informações do estoque de edificações existentes para a criação dos arquétipos conforme indicam Malkawi et al (2016). O desenvolvimento dos arquétipos de edificações existentes deve conter características típicas dos edifícios, como a geometria, os tipos de envoltória, seu uso e operação etc. Para o desenvolvimento do arquétipo energético Ye, Hinkelman, et al (2019), propuseram seis categorias de levantamento: (1) condição climática, (2) geometria, (3) envelope, (4) rotina de ocupação e operação, (5) cargas internas e (6) sistemas. Já para o desenvolvimento dos arquétipos dos edifícios de escritórios no presente trabalho as variáveis de interesse foram agrupadas em três categorias, assim como propuseram Huang, Franconi (1999): (1) características físicas da edificação, incluindo geometria e dados da envoltória; (2) Sistemas e recursos que utilizam energia na edificação; (3) rotina de ocupação e operação da edificação.

Após a definição dos arquétipos estes foram modelados no Energy Plus e seu consumo comparado com o consumo de referência de benchmarking previamente elaborado.

No Brasil o acesso aos dados das edificações é restrito, sendo estes dados considerados privados. Para este trabalho, portanto, foi necessário desenvolver uma parceria com a prefeitura local para obtenção dos dados dos projetos arquitetônicos de edifícios construídos na cidade e os dados de consumo de energia foram obtidos previamente em uma pesquisa anterior em que foi feita uma parceria com a concessionária de energia elétrica local. Foi feito ainda levantamento usando ferramentas de survey e visitas *in loco*.

As fontes de dados e as informações utilizadas para a criação do arquétipo foram então:

- Geometria da edificação: os dados edilícios foram obtidos a partir de parceria com a Prefeitura de Belo Horizonte na qual foi possível obter os projetos arquitetônicos dos edifícios. Nestes projetos foi possível levantar: a área das salas, dos banheiros e das circulações; a quantidade de salas; o número de

elevadores e de salas, o número de pavimentos de salas e de garagem; a área das fachadas e das aberturas; o pé direito e os tipos de janela. Para determinação dos tipos de vidro e das absorvâncias das paredes externas, foi utilizada a metodologia de Ribeiro (2016) para levantamentos em edificações existentes. Também foi levantado o entorno das edificações determinado pela distância e altura das edificações vizinhas.

- Principais recursos e sistemas que utilizam energia na edificação: através do *Google Maps/Street View* e de visitas *in loco* verificou-se a quantidade de aparelhos de ar-condicionado existentes nas fachadas das edificações. Constatou-se que os sistemas de refrigeração utilizados são o sistema individual split ou aparelhos de janela. O COP utilizado para os aparelhos foi de 3.2W/W (Alves et al, 2017). A vazão de ar externo foi modelada de acordo com a especificação da NBR 16401-3 (ABNT, 2008) sendo considerada de 27m<sup>3</sup>/h.pessoa. A ventilação natural foi modelada utilizando o modelo multizona do Airflow Network (AFN). Foi utilizado o módulo do Energy Management System (EMS) para controle de abertura e fechamento da janela de acordo com a temperatura interna. Para as informações de densidade de potência instalada de iluminação e densidade de potência dos equipamentos foram utilizados dados de literatura, pois devido a pandemia do COVID 19 não foi possível a visita interna dos edifícios.
- Rotina de ocupação e operação da edificação: foram levantadas pelo endereço e através do *Google Maps* foram identificadas as atividades existentes em cada local e seu horário de funcionamento. Como os horários de funcionamento das empresas apresentaram uma variação significativa, foi utilizado o tempo médio do levantamento para a simulação computacional. A quantidade de pessoas por sala foi obtida a partir de dados da literatura.

Em cada um dos edifícios da amostra, foram coletados e tabelados os dados nos projetos disponíveis como WWR, área das salas e de banheiros, área do andar, número de andares, tipo de vidro, cores das paredes externas, tipo de abertura. Para a construção do arquétipo estas características foram determinadas a partir dos valores médios obtidos. A orientação solar usada para a simulação foi aquela de maior frequência de ocorrência no tecido analisado.

O indicador de desempenho escolhido para analisar a amostra de dados foi o de Intensidade no Uso de Energia (EUI, *Energy Use Intensity*), definido como o consumo de energia medido por área útil, ou seja, em kWh/m<sup>2</sup>.ano. Para as simulações foi utilizado o *software* EnergyPlus 9.2.

A cidade de análise é Belo Horizonte, localizada na região Sudeste do Brasil, cidade que possui um clima ameno, com significativo potencial para o uso de ventilação natural em edificações. De acordo com a classificação de Köppen, a cidade é considerada como de clima temperado

(Cwa), com verões quentes e invernos amenos. As temperaturas médias no inverno são de 19 °C e as temperaturas médias no verão são de 24 °C. A umidade relativa normal anual é de 70%, a média anual de precipitação total é de 931 mm. Os dados meteorológicos analisados foram obtidos no Climate One Building (Climate One Building, 2022), no formato arquivo climático TMYx 2007-2021.

Para a análise dos dados de consumo do arquétipo, foi utilizado *benchmarking* proposto por Veloso, Souza e Santos (2020) para edifícios de escritório totalmente condicionados ou com condicionamento de ar de modo misto para a cidade de Belo Horizonte. Neste trabalho foi apresentado um *benchmarking* de consumo de energia para essas tipologias e definido o consumo de energia médio de uma amostra de 127 edificações.

### Discussão e análise de resultados

Neste trabalho foi utilizado características de 44 das 127 edificações utilizadas por Veloso, Souza e Santos (2020). Foram selecionados os edifícios de escritório de condicionamento híbrido construídos em Belo Horizonte e os dados foram levantados e tabelados para que fosse possível compreender o consumo de energia dessa tipologia de edificação. Para estas edificações a forma retangular foi a que teve maior ocorrência, com 55% da amostra, que também apresentou tipologias com planta triangular e em formato de U ou L. Assim a tipologia retangular será a tipologia que será discutida neste artigo.

#### Caracterização do Arquétipo

A amostra com o formato retangular apresentou em média 2 andares de garagem e 13 andares com salas. Com relação aos andares, o que se percebeu foi a predominância da divisão celular dos espaços e pequena ocorrência de andares livres. A média do número de salas por andar foram de 9. Dessas, 50% apresentaram algum sistema de climatização artificial.

Com relação às aberturas, cerca de 80% das janelas encontradas são do tipo basculante, demonstrando a possibilidade de uso da ventilação natural durante o horário de ocupação. Os vidros utilizados nas edificações da amostra em sua maioria são transparentes, sendo assim, utilizou-se um fator solar de 0,87 para as aberturas.

A cor das paredes externas encontradas variou entre um tom de areia e de marrom e a cobertura na sua maioria é composta de vedação externa de telha fibrocimento cinza já escurecida. Para a transmitância das paredes e coberturas utilizou-se dos dados de literatura, com um padrão de construção utilizado na época de construção das edificações analisadas, já que não foi possível obter nos projetos essa informação.

Os horários de ocupação, de operação da iluminação e dos equipamentos foram obtidos de acordo com as atividades desenvolvidas nas edificações levantadas por meio do *Google Maps*. O DPI de iluminação, a potência dos equipamentos, o COP do ar-condicionado e a taxa de ocupação foram considerados igualmente para todas as salas (Tabela 02).

Tabela 1: Características arquitetônicas dos arquétipos.

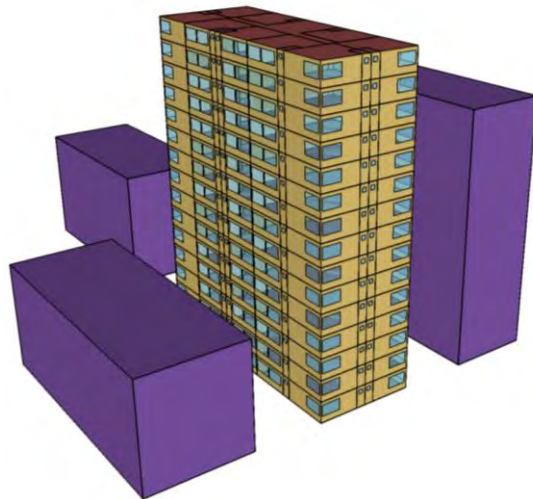
Características Arquitetônicas		mínimo	máximo	arquétipo
Comprimento	m	17.35	68.90	37.30
Largura	m	8.40	38.35	14.35
Altura	m	10.35	93.8	48.75
Número de fachadas sem janela	-	0	2	0
Perímetro	m	56.10	174.34	103.30
Número total de pavimentos	-	3	28	15
Número total de pavimentos com salas	-	2	23	11
Área total edificação	m <sup>2</sup>	1,778.00	26,865.10	8,028.83
Área total circulação	m <sup>2</sup>	104.80	2,482.52	926.86
Pé-direito	m	2.74	3.52	3.25
WWR	%	6	51	24
Quantidade de Salas	-	6	253	99
Tamanho das salas	m <sup>2</sup>	15.00	709.75	50.10
Número de salas condicionadas	-	4	144	50
Forma das salas	-	-	-	retangular
Tipo de janela	-	-	-	basculante (80%)
Tipo de vidro	-	-	-	Incolor (42%)
Fator Solar do Vidro	-	-	-	0.87
Absortância paredes	-	-	-	0.5 (cinza claro)
Absortância cobertura	-	-	-	0.6 (cinza médio)
Entorno	Afastamento (m)	0	15	15
	altura média (m)	6	66	47

Tabela 2: Rotina e potência de iluminação e equipamentos.

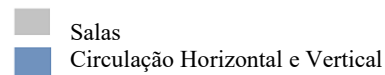
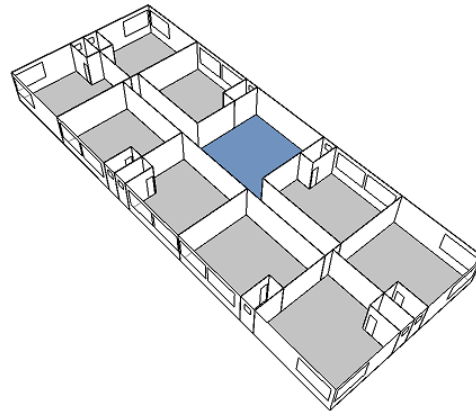
Sistemas e rotinas		
Iluminação salas (DPI)	W/m <sup>2</sup>	11.9
Iluminação banheiro (DPI)	W/m <sup>2</sup>	5
Iluminação corredor (DPI)	W/m <sup>2</sup>	5
Equipamentos	W	720
COP Ar-Condicionado	W/W	3.2
Ocupação	pessoa/sala	6
Rotina de Ocupação	h/dia	10:20
Rotina de Iluminação	h/dia	4:00

### Caracterização do Arquétipo

A partir das Tabelas 01 e 02, foi possível construir o arquétipo da tipologia, como pode ser visto nos modelos do Energy Plus Input File apresentados na Figura 01. Na figura está apresentado a volumetria e a divisão das salas nos andares. O arquétipo foi considerado inserido de um contexto urbano, ou seja, considerou-se a presença média das edificações de entorno da amostra. Buscou-se elaborar para o arquétipo uma planta com disposição das salas e circulação próxima do que foi encontrado na maioria dos edifícios da amostra.



(a) Volumetria



(b) Planta dos andares

Figura 1: Arquétipo do edifício do edifício de escritório.

Os parâmetros de simulação adotados foram obtidos a partir da análise detalhada dos parâmetros da base de dados das edificações da amostra. Analisando o consumo de energia obtem-se 60,2 kWh/m<sup>2</sup>.ano. No trabalho de Veloso, Souza e Santos (2020), o consumo médio das edificações de escritório com ventilação híbrida em Belo Horizonte foi de 56,6 kWh/m<sup>2</sup>.ano, que representa um consumo de energia encontrado 6% menor que o do arquétipo desenvolvido. A diferença encontrada é considerada pouco significativa, mas pode ter ocorrido devido à variação dos horários de ocupação nos quais é utilizado o sistema de condicionamento de ar.

Ainda com relação ao trabalho de Veloso, Souza e Santos (2020), quando se considera a tipologia de ventilação híbrida comparada à tipologia 100% condicionada, verifica-se que o consumo da tipologia com ventilação híbrida é em média 38% menor. Com isso torna possível afirmar que esta é uma tipologia não apenas possível de se utilizar em cidades com climas amenos, como Belo Horizonte, mas também uma tipologia recomendável.

Assim, entende-se que a análise do potencial de economia de energia dessas edificações passa pelo entendimento do uso da ventilação natural e dos horários e situações nas quais o usuário utiliza o sistema de ar-condicionado, para proporcionar maiores possibilidades aos projetistas na criação de melhores maneiras de aberturas das janelas, aumentando assim, o conforto do usuário.

### Conclusão

Este estudo apresentou levantamento de dados de edifícios existentes usando dados de projetos, levantamentos *in loco* e dados de literatura para desenvolvimento de arquétipos de edifícios de escritório com ventilação híbrida. O estudo de caso foi feito para a cidade de Belo Horizonte, Brasil, mas pode ser aplicado em outras localidades com contextos climáticos favoráveis à ventilação natural dos espaços, analisando o

potencial que edificações com ventilação híbrida apresentam na redução do consumo de energia.

Com base nesse estudo, verificou-se uma proximidade do consumo de energia elétrica do arquétipo proposto com o consumo médio medido de edificações dessa tipologia na cidade estudada, o que o caracteriza com um arquétipo que poderá ser utilizado em futuros trabalhos. A metodologia e o desenvolvimento do arquétipo apresentam informações importantes no desenvolvimento dos modelos e para os resultados encontrados. Futuros trabalhos poderão partir desse desenvolvimento e refinar os dados que foram usados de literatura.

A compreensão e o levantamento de dados para o desenvolvimento de arquétipos é um passo fundamental para alcançar resultados significativos e gerar diretrizes para economia de energia dessa tipologia.

### Agradecimentos

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais, FAPEMIG, pelo financiamento da pesquisa.

### Referências

- ABNT, Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários, Parte 3: Qualidade do ar interior, NBR 16.401-3, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008.
- Alves T., Machado, L., Souza, R.V.G., de Wilde, P. A methodology for estimating office building energy use baselines by means of land use legislation and reference buildings. *Energy and Buildings*, 143 (2017), pp. 100-113.
- Alves, T., Machado, L., Souza, R.V.G., de Wilde, P. Assessing the energy saving potential of an existing high-rise office building stock. *Energy and Buildings*, 173 (2018) pp. 547-561.
- Arjunan, P., Poola, K., Miller, C. BEEM: Data-driven Building Energy benchmarking for Singapore. *Energy and Building*, 260 (2022) pp. 111869.
- Asadi, S., Amiri, S.S., Mottahedi, M., On the development of multi-linear regression analysis to assess energy consumption in the early stages of building design. *Energy and Buildings*, 85 (2014), pp.246-25.
- Borgstein, E. H., Lamberts, R. Developing energy consumption benchmarks for buildings: Bank branches in Brazil. *Energy and Buildings*, 82 (2014) pp. 82-91.
- Bucley, N., Mills, G., Reinhart, C., Berzolla, Z.M. Using Urban Building Energy Modelling (UBEM) to support the new Europe an Union’s Green Deal: Case study of Dublin Ireland. *Energy and Buildings*, 247 (2021) pp. 111115.
- Climate One Building, c2020. Available at: <<http://climate.onebuilding.org/>>. Accessed in: April, 2022.
- De Wilde, P. Performance Criteria in Building performance analysis, (Wiley Online Library). John Wiley & Sons, Ltd. (2018).
- Geraldi, M. S., Ghisi, E. Mapping the energy usage in Brazilian public schools. *Energy and Buildings*, 224 (2020), pp. 110209.
- Gnecco, V.M., Geraldi, M.S., Fossati, M., Triana, M.A. Comparison between national and local benchmarking models: The case of public nursery schools in Southern Brazil. *Sustainable Cities and Society*, 78 (2022) pp.103639.
- Harputulugil T., de Wilde, P. The interaction between humans and buildings for energy efficiency: A critical review. *Energy Research & Social Science*, 71 (2021) pp. 101828.
- Huang, J. and Franconi, E., 1999. Commercial heating andcooling loads component analysis. Berkeley, CA: Lawr-ence Berkeley National Laboratory.
- Kneifel, J. Life-cycle carbon and cost analysis of energy efficiency measures in new commercial buildings. *Energy and Buildings*, v. 42, n. 3, 2010, p. 333–340.
- Kolokotsa, D.; Nikolaou, T.; Stravrakakis, G. Review on methodologies for energy benchmarking, rating and classification of buildings. *Advances in Building Energy Research*, v. 5, p. 53–70, 2011
- Leroy, L. Archetypal Building Energy Model. Disponível em: <https://emi-ime.ca/inventory-model/archetypal-building-energy-model/>. Acesso: 22 Novembro 2022.
- Malkawi, A., Yan, B. Chen, Y., Tong, Z. Predicting thermal and energy performance of mixed-mode ventilation using an integrated simulation approach. *Building Simulation*, 9 (2016) pp. 335-346.
- MME - Balanço Energético Nacional 2022: Ano base 2021. Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro (2022). Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022> (Acesso: 29 Novembro 2022).
- Monteiro, C.S., Cerezo, C., Pina, A., Ferrão, P. A method for the generation of multi-detail building archetype definitions: application to the city of Lisbon. *Cisbat Conference*. 2015. Lausanne, Switzerland.
- Nikolaou, Triantafyllia; Kololotsa, Dionysia; Stravrakakis, George; Apostolou, Apostolos; Munteanu, Corneliu. *Managing Indoor Environments and Energy in Buildings with Integrated Intelligent Systems*. Switzerland, Green Energy and Technology, 2015, p. 261.
- Park, H.S. et al. Development of a new energy benchmark for improving the operational rating system of office buildings using various data-mining techniques. *Applied Energy*, 173 (2016) pp. 225–237.

- Pérez-Lombard, L. et al. A review of benchmarking, rating and labelling concepts within the framework of building energy certification schemes. *Energy and Buildings*, v. 41, n. 3, p. 272–278, 2009.
- Ribeiro, N. F. Procedimentos simplificados para a avaliação da envoltória pelo método prescritivo do RTQ-C, com foco em edificações existentes. [Dissertação de Mestrado] Universidade Federal de Minas Gerais, 2016.
- Veloso, A. C. O., Souza, R. V. G., Santos, F.N. Energy benchmarking for office building towers in mild temperate climate. *Energy and Buildings*, 222 (2020) pp.110059.
- Ye, Yunyang, Kathryn Hinkelman, Jian Zhang, Wangda Zuo, and Gang Wang. A methodology to create prototypical building energy models for existing buildings: A case study on US religious worship buildings. *Energy and Buildings*, v. 194, p. 351-365, 2019.
- Zhao, H. Magoulès, F, A review on the prediction of building energy consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (2012) pp.3586-3592.
- Zou, P.X.W., Xu, X., Sanjayan, J., Wang, J. Review of 10 years research on building energy performance gap: Life-cycle and stakeholder perspective. *Energy and Buildings*, 178 (2018) pp. 165-181.

## Análise comparativa de dois algoritmos de condução térmica CTF e HAMT e os riscos de condensação em uma parede histórica com barreira de vapor

Maritza da Rocha Macarthy<sup>1</sup>, Eduardo Grala da Cunha<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Programa de Pós-graduação de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas (UFPEL), Pelotas/RS, Brasil

### Resumo

A influência de alta umidade relativa e baixa temperatura afetam as edificações históricas tanto em seu desempenho térmico como em sua preservação. Este estudo apresenta uma análise comparativa de dois algoritmos de condução térmica e riscos de condensação em uma parede histórica. Adotou-se sistema construtivo com barra de vapor e dois softwares: o *Energy Plus 9.0* para ventilação natural considerando dois algoritmos CTF e HAMT, e o *Wufi Pro 6.6* para ventilação natural e climatizada artificialmente. Os resultados mostraram que o algoritmo HAMT a temperatura é maior nos meses de inverno, e o desempenho foi melhor no ambiente climatizado artificialmente.

### Introdução

O desempenho higrotérmico tem sido uma questão importante nos últimos anos no que se refere à reabilitação das edificações históricas. Porém, no Brasil, existe uma carência de normas específicas para esse tipo de edificação e sobre questões de desempenho e preservação do patrimônio histórico. Caracterizado pelo comportamento térmico e comportamento da umidade nas edificações em seus elementos construtivos, a partir do desempenho higrotérmico busca-se analisar como as edificações comportam-se quando expostas a determinadas condições climáticas e ambientais. As normas brasileiras não consideram a variação sazonal e espacial da intensidade e/ou concentração dos agentes de degradação (ZANONI, 2015), assim como não há normatização brasileira para desempenho higrotérmico. Os impactos do transporte de vapor nas superfícies internas das paredes externas e os riscos de condensações superficiais internas que uma edificação histórica pode sofrer quando exposta às condições climáticas e ambientais de temperatura e umidade comprometem o conforto térmico dos usuários e durabilidade dos componentes construtivos. Os materiais higroscópicos são responsáveis pelos fenômenos patológicos, como eflorescências e criptoflorescências. Esses materiais têm a propriedade de absorver a umidade e impedir a evaporação pelos poros. A influência climática nas condensações das superfícies é destacada por Morishita (2020), que alerta sobre o risco potencial de umidade em edifícios presente em diversas regiões brasileiras, principalmente as que possuem condições climáticas de altos valores de pressão de vapor externo e de altas taxas de chuva com ação de vento. No caso das edificações, Afonso (2018) afirma que, além da umidade contida no ar atmosférico local, existem também fontes internas de liberação de vapor d'água que

umentam o conteúdo de umidade do ar interior e, consequentemente, a umidade nos materiais das edificações. De acordo com Guerra (2012), em se tratando de edificações históricas, estas estarão sujeitas à ação da passagem do tempo e dos agentes de degradação, resultando em manifestações patológicas e formação de fungos.

Atualmente, já existem no mercado ferramentas de simulação higrotérmica que permitem simular a transferência de umidade em regime variável e avaliar o comportamento das condensações internas. De acordo com a norma EN 15026 (2007), o software de simulação higrotérmica estabelece alguns parâmetros para calcular os fenômenos de transporte e armazenamento de calor e umidade. No que diz respeito à transferência de calor, é considerada a condução, os fluxos de entalpia resultantes da mudança de fase, a radiação de onda longa e a radiação solar. Quanto à transferência de umidade, é considerada a difusão para a fase de vapor e a capilaridade e a difusão de superfície para a fase líquida. De acordo com Journe (2010) e Mendes (1997), é possível avaliar os riscos de condensação e de deterioração do sistema construtivo por meio da simulação computacional.

### Objetivo

Este estudo tem por objetivo realizar uma análise do desempenho higrotérmico de uma parede histórica comparando dois algoritmos de condução térmica, CTF e HAMT, e os riscos de condensação e de formação de fungos filamentosos nas superfícies internas da parede externa nas paredes históricas com acréscimo de barreira de vapor, localizada em Pelotas, RS, na zona bioclimática 2 (ZB2).

### Método

O método possui três etapas:

-Na primeira etapa, foi escolhida uma edificação histórica e definida sua tipologia, para o estudo com sistema construtivo de paredes de tijolos maciços com acréscimo de barra de vapor na superfície interna.

-Na segunda etapa, foram realizadas simulações em dois softwares: *Energy Plus 9.0* e *Wufi Pro 6.6*. Para as simulações no software *Energy Plus 9.0* foram configuradas para ventilação natural as condições ambientais internas com dois modelos de cálculo: primeiro algoritmo de transferência de calor (CTF) e o segundo algoritmo de transferência de calor e umidade (HAMT). As simulações no software *Wufi Pro 6.6* foram realizadas para ambientes com ventilação natural e climatizada artificialmente.

-Na terceira etapa, foram feitas avaliações de saída dos gráficos, para comparação dos algoritmos e por critérios



definidos para os riscos de condensação e de formação de fungos filamentosos.

**Etapa 1: Definição do objeto de estudo**

A tipologia construtiva escolhida foi uma edificação histórica do século XIX, Casarão 02, na cidade de Pelotas, RS. O estudo ocorreu no segundo pavimento, nas salas 22, 23 e 25, onde funciona a Secretaria Municipal de Cultura (SECULT) (Figura 1). Segundo a NBR 15220 (2005), a cidade está na zona bioclimática 2 (ZB2), com características de clima subtropical úmido, sem período seco e com alta frequência de precipitação.

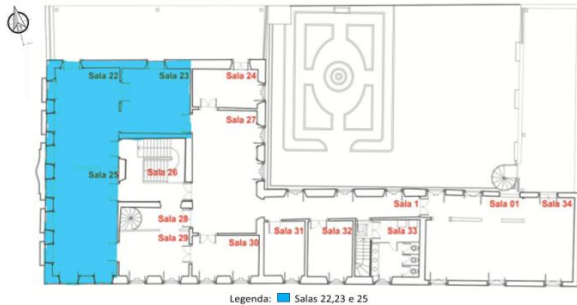


Figura 1: Planta baixa do segundo pavimento do Casarão 02.

Fonte: adaptado de SECULT (2020).

Para o estudo foi configurada a parede de tijolo maciço (TM) com acréscimo de barra de vapor de membrana hidrófuga (MH), configurados de acordo com NBR 15220 (2005), transmitância térmica mínima de 2,5 [W/(m²K)] (Figura 2). O fechamento com telha cerâmica de 1 cm de espessura, câmara de ar e forro de madeira, com transmitância térmica de 2,3 [W/ (m² K)], e no interior o piso em madeira de tábuas corridas, janelas com vidro simples com postigos de madeira e portas-janelas de madeira nas três salas. As propriedades térmicas dos componentes construtivos da edificação estão na Tabela 1.

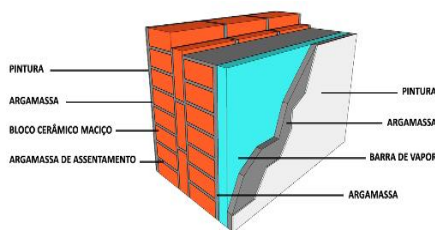


Figura 2: Camadas construtivas da parede.

Fonte: adaptado de SECULT (2020).

Tabela 1: Propriedades térmicas dos componentes construtivos da edificação.

Estrutura	Materiais	Espessura (m)	Condutividade Térmica(W/m.K)	Densidade Aparente(Kg/m³)	Calor Específico(J/Kg.K)
Parede	Tijolo maciço	0,381	1,057	1961	920
	Reboco exterior	0,0295	0,8	1200	850
	Membrana hidrófuga	0,001	1,0	83	1800
	Reboco interior	0,0285	0,8	1200	850
Cobertura	Telha cerâmica	0,010	0,7	1600	920
	Forro madeira	0,025	0,29	800	1034
Piso	Piso madeira	0,025	0,29	800	1034
Esquadrias	Porta madeira	0,025	0,29	800	1034
	Vidro	0,003	0,09		

Fonte: Adaptado de ABNT, 2005.

**Etapa 2: Simulações**

**Energy Plus 9.0**

As simulações no software Energy Plus 9.0 foram realizadas com objetivo de criar dois arquivos de clima interior com a temperatura operativa interna para a ventilação natural com dois algoritmos: o primeiro algoritmo padrão que o Energy Plus de dução e convecção (CTF) emprega para as simulações dos fluxos de calor, das temperaturas superficiais e do ar interno neste modelo, o algoritmo não considera o transporte de umidade nas paredes (Macarthy et al., 2022). O segundo algoritmo, transferência de calor e umidade (HAMT), foi utilizado com os parâmetros Material Property: Heat and Moisturetransfer (HAMT) Settings, Sorptiiontsothem, Suction, Redistribution, Difusion, Thermal Conduction de acordo com Morishita (2020), com valores extraídos das funções higrótérmicas do software Wufi Pro 6.6.

Para isso, as modelagens das três salas da edificação foram realizadas no software SKetchUp Make 2018, plugin Euclid 9.3 e da cobertura, considerando a câmara de ar com resistência térmica de 0,21(m²K) /W, conforme NBR 15220 (2005). A agenda de uso ocupação conforme RTQ-C (2012), onde trabalham nove pessoas durante os cinco dias da semana em horário comercial, das 08h às 17h. Para a agenda de iluminação artificial padrão, com os valores da taxa metabólica, densidade de potência de iluminação e as cargas internas de equipamentos 1,5 W/m². Para a ventilação natural, a configuração foi com o parâmetro AirflowNetwork, considerando-se as características da edificação e o controle de abertura de portas e janelas. De acordo com Martins (2009), a configuração para uso das janelas, com período de 8h ao dia e quando a temperatura do ar interno do ambiente é maior ou igual a 25° C, e quando a temperatura do ar externo é inferior à temperatura do ar interno em até 5° C. A temperatura do solo foi configurada como adiabático na troca de calor com o pavimento inferior.

Os dados de saída foram exportados no programa Python e, a partir deles, gerados os dois arquivos EPW que configuram a condição ambiental interna das salas, para o primeiro (CTF) e segundo (HAMT) algoritmo, da temperatura média horária interna e umidade relativa do ar interno.

**Wufi Pro 6.6**

Para simulação higratérmica foi construída uma parede com camadas de tijolo maciço (TM) e membrana hidrófuga (MH) (Figura 3).


Parede	Sistema Construtivo	Descrição	Espessura total Transmitância Resistência
Tijolo Maciço + Membrana Hidrófuga (TM - MH)		Reboco de argamassa + Tijolo Maciço + Membrana Hidrófuga + Reboco de argamassa	$U=1,757 \text{ /}(m^2K)$ $R=0,39(m^2K)/W$ Espessura total= $0,141m$

Figura 3: Camadas construtivas da parede no software WUFI Pro.

Fonte: adaptado de SECULT (2020)..

As propriedades dos materiais com valores calculados pelo modelo de cálculo da transferência de calor e de umidade, das equações diferenciais de Künzel, foram extraídas do banco de dados do software Wufi Pro 6.6. Os parâmetros configurados como orientação das fachadas Sul e Norte: altura do edifício (m) até 20 m, chuva incidente calculada de acordo com a norma ASHRAE 160, climatizado artificialmente de acordo com a ASHREA 160 (2016). Os parâmetros dos coeficientes de transferência à superfície, absorção (radiação de onda curta) de 0,2 (claro); valor de refletividade do solo (onda curta) foi de 0,2, valor padrão do programa. O período de análise da simulação foi de três anos com intervalo de tempo de 1 hora. Para os dados de clima exterior o arquivo climático desenvolvido por Leitzke et al. (2018) com a base de dados da EMPRAPA (2021) referente à cidade de Pelotas/RS no formato TRY. Para o clima interior as condições higratérmicas internas para o Casarão 02 no software Wufi, de acordo com a EN 15026 (2007), foram avaliadas na condição de ventilação natural. Em um primeiro momento, foram utilizados os arquivos gerados da primeira simulação com algoritmo de transferência de calor (CTF), que definiu o clima interno das salas. Depois, foram utilizados os arquivos gerados com o segundo algoritmo HAMT e para o clima interior climatizado artificialmente, segundo a ASHREA 160 (2016).

### Etapa 3: Critérios de avaliação

Para ocorrência de condensações interiores se nas camadas do sistema construtivo atingir 100% de umidade relativa, há existência desses pontos traduzirem a ocorrência de condensações interiores (FRANÇA, 2013), de acordo com as normas ASHRAE (2016) e EN 15026 (2012).

Para formação de fungos filamentosos foram adotados as avaliações do modelo Vittanen do plugin Wufi-Bio. Para as análises da taxa de crescimento e índice de micélio, foi utilizado o modelo sinalização de Seldbauer (2003). O modelo de Viitanen utiliza como saída seis níveis, de 0 a 6, para classificar o índice de mofo.

## Resultados

### Comparativo da temperatura relativa interna dos algoritmos CTF e HAMT

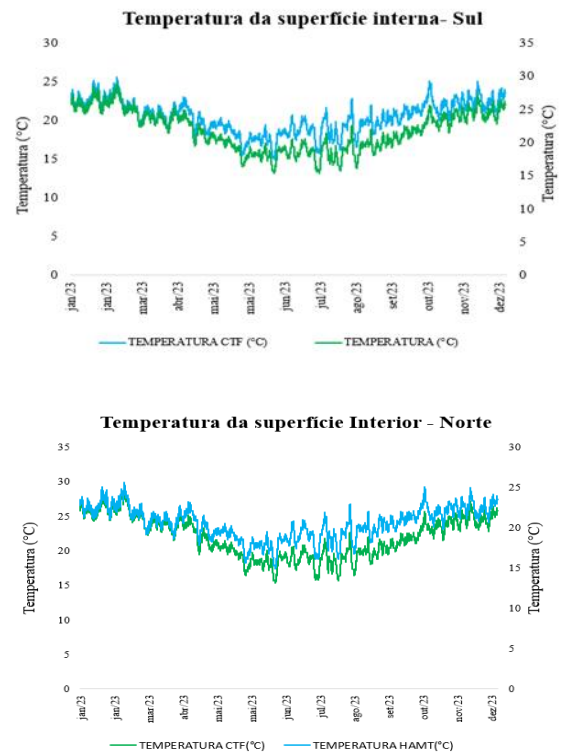
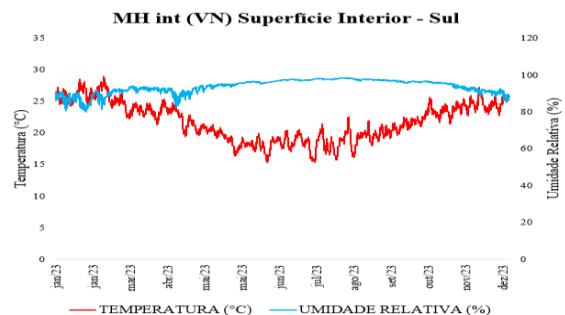


Figura 4: Comparativo da temperatura relativa interna CTF-HAMT-Sul e Norte.

Fonte: Autores(2022).

Comparando os dois algoritmos de transferência de calor (CTF) e de transferência de calor e umidade (HAMT) para ambientes ventilados naturalmente observa-se, na figura 4, um comportamento semelhante com valores muito próximos para as duas orientações. Como no período de verão, quando as temperaturas são muito próximas, as vezes se sobrepõe para ambos os algoritmos em torno de 25° C a 30° C. Para o algoritmo de transferência de calor, a temperatura no período de inverno fica em torno de 15° C a 20° C. Para o algoritmo de transferência de calor e umidade, a temperatura no período de inverno fica em torno de 17° C a 25° C.

### Análise do risco de condensação de vapor



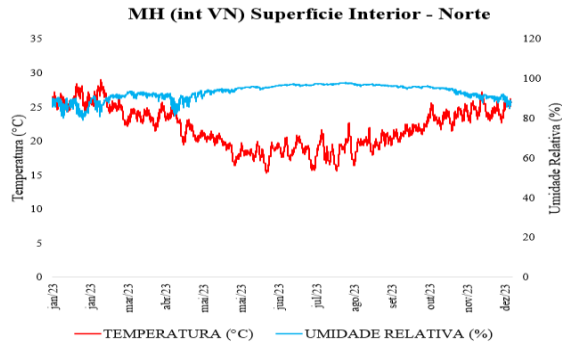


Figura 5: Gráficos de risco de condensação de vapor parede MHint-Sul e Norte para algoritmo CTF

Fonte: Autores(2022).

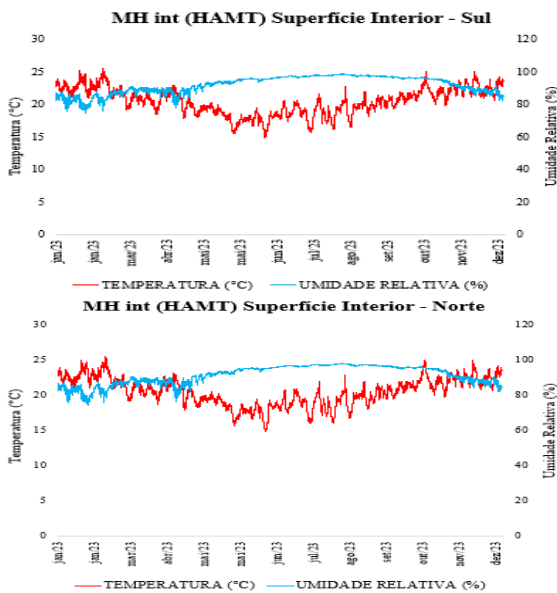


Figura 6: Gráficos de risco de condensação de vapor parede MHint-Sul e Norte para algoritmo HAMT

Fonte: Autores, 2022.

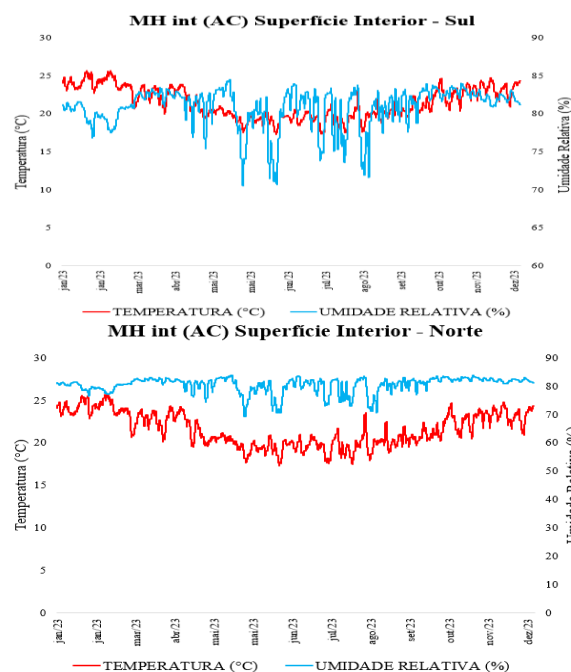


Figura 7: Gráficos de risco de condensação de vapor parede MHint-Sul e Norte climatizada artificialmente.

Fonte: Autores(2022)

Na figura 5, observou-se que, no sistema de MHint (VN) para a ventilação natural, a umidade relativa é muito alta durante o ano todo, em torno de 98%, indicando risco de condensação de umidade. A temperatura das superfícies internas da parede, por sua vez, estão frias, em torno dos 15° C, nos meses de inverno. Comparando com a figura 6 do sistema MH int (HAMT) nos meses de inverno, a umidade relativa fica próxima do 100%, com temperatura próxima dos 17° C, havendo condensação na parede, indicando a influência das condições climáticas da ZB2. Já nos meses de verão, a curva da temperatura na superfície interna atingiu 25° C, o que indica um período de aquecimento nas superfícies internas da parede. Comparando com o sistema MHint (AC), figura 7, nota-se que a climatização do ambiente com a barreira de vapor ajudou a aquecer a parede, pois ocorreu uma redução da umidade relativa, que oscilou entre 70% e 80%.

### Análise riscos de formação de fungos

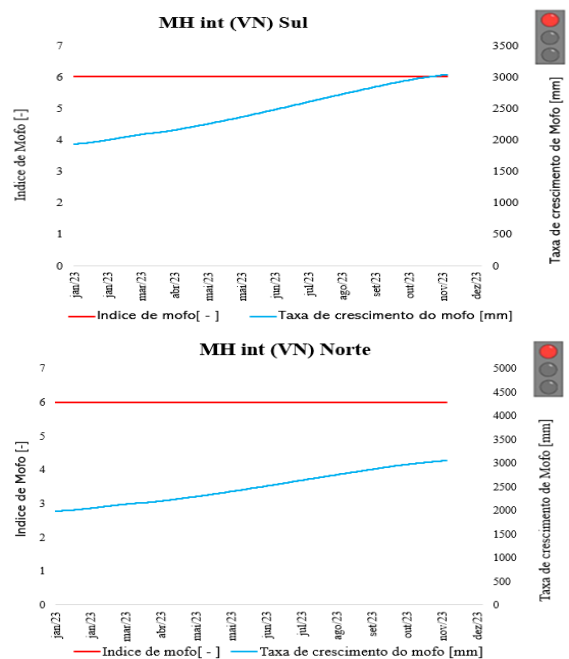
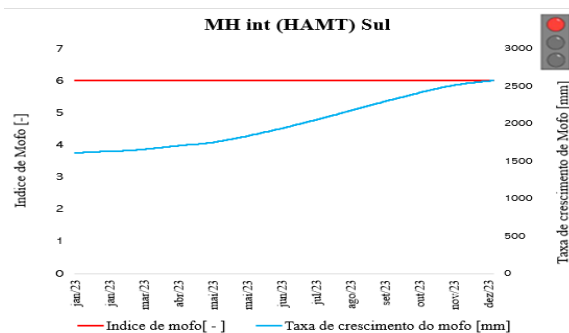


Figura 8: Taxa de crescimento e índice de micélio -MH int(VN).

.Fonte: Autores(2022).



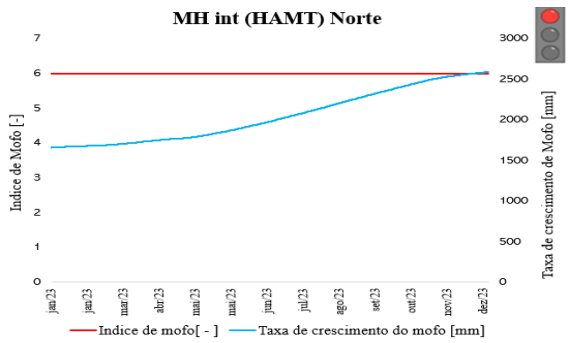


Figura 9: Taxa de crescimento e índice de micélio -MH int(HAMT).

Fonte: Autores(2022).

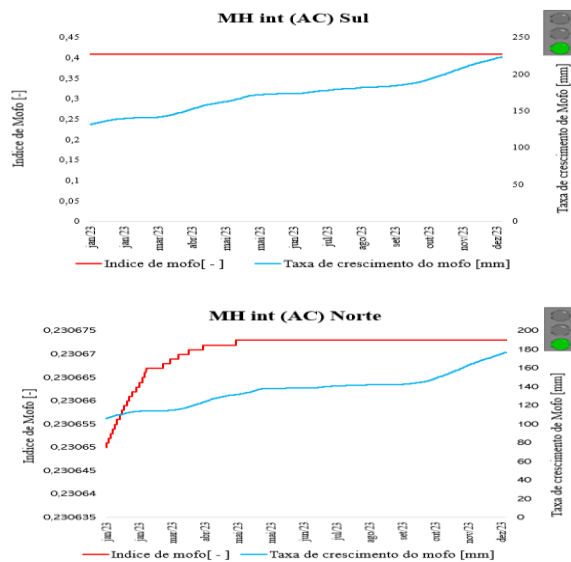


Figura 10: Taxa de crescimento e índice de micélio – MH(AC).

Fonte: Autores(2022).

Verificou-se nas condições analisadas para ventilação natural dos sistemas com acréscimo de membrana hidrófuga interior MHint (VN) e MH int (HAMT) (Figuras 8 e 9) um alto risco na formação de fungos filamentosos para as duas orientações. Os teores de umidade do esporo (azul) ultrapassaram o teor crítico de umidade (vermelho), com avaliação de sinalização para a superfície interna ou posições do usuário, comprometendo a qualidade do ar interno. Porém, para o sistema MHint (AC) (Figura 10), climatizada artificialmente, há condições favoráveis a não formação de fungos, uma vez que houve uma redução das taxas de crescimento nas duas orientações e os índices de micélio  $\leq 1$ , sendo avaliado como aceitável. Quanto aos teores de umidade do esporo (azul) e teor crítico de umidade no esporo (vermelho), os mesmos foram avaliados como aprovados pela sinalização.

## Conclusões

Quando comparados os modelos de ventilação natural de transferência de calor (CTF) e de transferência de calor e umidade (HAMT), percebeu-se que as propostas dos dois

apresentaram um comportamento muito semelhante. Além disso, foi possível identificar que utilizar o algoritmo de transferência de calor e umidade é mais interessante em função do mesmo considerar os parâmetros de coeficiente de difusividade hídrica, resistência da difusão de vapor e condutibilidade térmica dos materiais. Concluiu-se que a edificação histórica do Casarão 02, para estas configurações de ventilação natural, não possuem um bom desempenho higrotérmico para o clima subtropical úmido da cidade de Pelotas-RS na ZB2, havendo risco de condensação de umidade e de formação de fungos filamentosos, acarretando risco à saúde dos usuários das salas. Sendo mais satisfatório, então, quando o ambiente está climatizado para controlar a entrada de umidade e garantir a estanqueidade da umidade e da qualidade do ar para a saúde dos usuários de uma edificação histórica.

## Referências Bibliográficas

- ABNT – Associação Brasileira De Normas Técnicas (2021). NBR 15220- Parte 2: *Edificações Habitacionais Desempenho*. Rio de Janeiro.
- ABNT – Associação Brasileira De Normas Técnicas (2005). NBR 15220-Parte 3: *Desempenho Térmico de Edificações*. Rio de Janeiro.
- Afonso, T. M. (2018). Desempenho higrotérmico de edificações e procedimentos para previsão de ocorrência de bolores em ambientes internos: estudo de caso em habitações construídas com paredes de concreto. *Dissertação de Mestrado pela IPT- Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo São Paulo*.
- ASHRAE 160. Ashrae Standard 160(2016) Criteria for Moisture - Control Design Analysis in Buildings. Atlanta, USA.
- Fraunhofer Institute for Building Physics(2022). WUFI@ Pro 6.6 Manual. Holzkirchen.
- Deutsches Institut für Normung. EN 15026 (2007): Hygrothermal performance of building components and building elements: assessment of moisture transfer by numerical simulation. Berlin.
- Deutsches Institut für Normung. DIN 4108-2: (2003)Wärmeschutz und Energie - Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen na den Wärmeschutz. Berlin.
- DOE – United States Eaprtment Of Energy (2018). *EnergyPlus Documentation: Input Output References*. US Department of Energy.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Normas climatológicas: estacional. Disponível em: <<http://www.cpact.embrapa.br/agromet/estacao/estacional.html>>. Acesso em 20 de julho de 2021.
- França, C. M. C.(2013). Avaliação dos Programas para Quantificar Condensações em Engenharia Civil. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013*.

- Guerra, F. L.; Cunha, E. G.; Silva, A. C. B.; Knop, S. (2012). Análise das condições favoráveis à formação de bolor em edificação histórica de Pelotas, RS, Brasil. *Ambientes Construído*, Porto Alegre, v. 12, n. 4, p. 7–23.
- INMETRO - Instituto Nacional De Meteorologia, Qualidade E Tecnologia (2012). Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, *RTQ-C*.
- LABEEE - Laboratório De Eficiência Energética Em Edificações. PROJETEEE. Florianópolis. Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: <http://projeteee.mma.gov.br/componentes-construtivos/>. Acesso em: 20 jan. 2021.
- Leitzke, R. K. et al (2018). Optimization of the Traditional Method for Creating a Weather Simulation File: The Pelotas.epw Case. *Journal of Civil Engineering and Architecture* 12, 741-756.
- Macarthy, M.R., Bernarde, S.L.C., Duarte, C.D., Beber, L.A., Grigoletti, G.C., Cunha E.G (2022). Análise comparativa do desempenho térmico em edifício histórico segundo dois algoritmos de cálculo de condução térmica. XIX Encontro Nacional De Tecnologia Do Ambiente Construído/Conforto Ambiental e Eficiência Energética, *Anais* 19.
- Martins, D. J.; Raul, S. L.; Reckziegel S.; Priebe, A.; Silva, A. C. B. (2009) Ensaio sobre a utilização da automação de aberturas na simulação do desempenho térmico de edificações. In: Encontro Nacional e VI Encontro Latino-Americano de conforto no ambiente construído, 10. e 6., Natal, RN. *Anais [...]*. Natal: ENTAC, 2009. 1 CD-ROM.
- Mendes, N (1997). Modelos para Previsão da Transferência de Calor e de Umidade em Elementos Porosos de Edificações. *Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis*.
- Morishita, C (2020). On the assessment of potential moisture risks in residential buildings across Brazil. *Tese Doutorado em Engenharia Mecânica Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Paraná*.
- Jorne, F. J. F. (2010). Análise do comportamento higrotérmico de soluções construtivas de paredes em regime variável. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Knop, S. (2012). Comportamento Termoenergético de Edificação Histórica com novo uso na Cidade de Pelotas: O Caso do Casarão 02 – Secretaria Municipal da Cultura. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas,
- Zanoni, V. A. G. (2015). Influência dos agentes climáticos de degradação no comportamento higrotérmico de fachadas em Brasília. [s.l.] *Universidade de Brasília*.
- Zanoni, Vanda A. G.; Dantas, André L. DE F.; Nunes, L. S.; Rios, R. B. (2020). Estudo higrotérmico na autoconstrução: simulação computacional e medições em campo. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 20, p. 109–120, 2020.
- SECULT (2020). Secretaria de Educação e Cultura de Pelotas, Pelotas, RS.
- Sedlbauer, K. (2021) Prediction of mould fungus formation on the surface of an inside building components. Fraunhofer Institute for Building Physics.

## INTEGRACIÓN DE LA SIMULACIÓN MICROCLIMÁTICA EN ENVI-MET Y ENERGYPLUS PARA ANÁLISIS DE LA CARGA TÉRMICA EN EDIFICIOS RESIDENCIALES EN LA CIUDAD DE MONTEVIDEO

Pascual Ceriani<sup>1</sup>, Bianca Milani de Quadros<sup>2</sup>, Martin Gabriel Ordenes Mizgier<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento Regional Norte de Arquitectura, Universidad de la República, Uruguay, Salto.

<sup>2</sup> Laboratório de Conforto Ambiental (LabCon), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.

### Abstract

Las transformaciones morfológicas de la ciudad han demostrado generar variaciones en el microclima urbano. Este trabajo tiene como objetivo evaluar el impacto de la verticalización en la ciudad de Montevideo en las cargas térmicas en edificios residenciales, a partir de la integración de la simulación microclimática en ENVI-met y Energyplus mediante Grasshopper. Los resultados encuentran variaciones en la temperatura del aire, la velocidad del viento y la radiación directa, y consecuentemente en las cargas térmicas de refrigeración. Los estudios comparativos muestran que la geometría urbana contribuye a modificar la magnitud del impacto del microclima en el desempeño energético del edificio.

### Introducción

Las edificaciones son las estructuras predominantes en los entornos urbanos, con una participación relevante en el consumo de energía global. En el año 2019 las edificaciones fueron responsables por el 35% del consumo total final de energía a nivel mundial, contribuyendo al 38% de las emisiones de CO<sub>2</sub> relacionado al consumo de energía (UN-EP, 2020). Lo que contribuye directamente con el calentamiento global de la tierra. Debido a la necesidad de reducir las emisiones de gases contaminantes y adaptarse a modelos de desarrollo más sustentables, las edificaciones han sido un área importante en la búsqueda de la reducción en el consumo energético y el confort de las personas.

El calentamiento urbano tiene efectos opuestos sobre el consumo según el clima predominante. Mientras las ciudades donde hay un mayor consumo de energía para calefacción pueden beneficiarse de la reducción de la demanda de energía, las ciudades que demandan refrigeración intensificarán el consumo de energía (SANTAMOURIS et al., 2015).

La forma urbana juega un papel relevante en la carga térmica del edificio. Una mayor densidad urbana puede reducir el consumo de energía para refrigeración debido a las sombras provocadas por los propios edificios (ZHANG et al., 2021). Por otro lado, puede haber un aumento en el consumo de energía asociado con un aumento en la isla de calor urbana y una disminución en

la ventilación natural en el cañón urbano (SANTAMOURIS et al., 2001).

Desarrollado para simular el microclima de áreas urbanas con alta resolución espacial y temporal, el modelo ENVI-met se usa ampliamente para evaluar la efectividad de las estrategias de mitigación de la temperatura urbana. Muchos estudios se han centrado en métodos para integrar el modelo ENVI-met con modelos de simulación de comportamiento térmico de edificios, principalmente con el modelo EnergyPlus. En su trabajo Yang et al. (2012) presentaron un método para integrar los resultados del ENVI-met con la simulación energética de edificios en EnergyPlus mediante la plataforma Building Controls Virtual Test Bed (BCTVB). Natanian et al. (2019) presentaron un método para unir los resultados microclimáticos de ENVI-met con la simulación energética de edificios usando Grasshopper, mientras que la demanda de refrigeración se calculó con Honeybee. En Argentina Balter et al. (2021), a partir de la integración similar a la de los anteriores trabajos, consiguieron observar un alto grado de ajuste del modelo simulado y la temperatura del aire interior del edificio con diferencias de 0.50°C, considerando los datos microclimáticos obtenidos del ENVI-met.

Otro trabajo importante realizado por Tsoka et al. (2018) presenta un método para generar un archivo climático EPW anual, modificado a partir de las variaciones del microclima en el cañón urbano ENVI-met. La novedad del método es la creación de conjuntos de datos de "año meteorológico típico" para la simulación energética de edificios, utilizando datos generados estocásticamente a través de la herramienta Meteonorm.

Los autores coinciden en que el flujo de trabajo funciona, pero se necesitan más estudios para su aplicación. A la luz de esto, este trabajo tiene como objetivo general analizar el impacto de las variaciones microclimáticas producidas por la verticalización de la ciudad y en las cargas térmicas de edificaciones residenciales en el clima de la ciudad de Montevideo (Uruguay) a través de la integración entre los modelos ENVI-met v5.0.2, Rhinoceros 7, Grasshopper y el conjunto de herramientas de Ladybug 1.4.

## Método

El método consistió en definir y generar la geometría de los escenarios de estudios. Simular las condiciones microclimáticas y sus variaciones respecto a los cambios morfológicos urbanos. Evaluar un método de integración de las condiciones microclimáticas en la simulación energética de edificios a través del archivo climático EPW.

## Estudio de caso

Como caso de estudio se utilizó un modelo teórico con base en las características urbanas de un área de la ciudad de Montevideo (UY), específicamente el cañón urbano conformado sobre la avenida 8 de octubre, entre las calles Merino Moreno y Pan de Azúcar. El cual se seleccionó debido a que tiene ancho de calle de 24 metros, principalmente compuesto actualmente por edificaciones bajas, en torno a los 6 metros de altura con uso comercial. Y debido a que las parcelas frentistas de esta avenida cuentan con la habilitación para construcción de edificaciones hasta los 31 metros de altura.

Con Grasshopper, se generó la geometría de los casos estudiados (figura 1). Se consideraron dos escenarios de estudio. Por un lado, un entorno bajo (C6m), donde la altura de las edificaciones que conforman el cañón estudiado es de 6m al igual que el entorno. Por otro lado con edificaciones altas (C31m), donde se considera la altura máxima permitida para las edificaciones. Esos dos escenarios se estudiaron considerando dos orientaciones del eje principal del cañón urbano, Este-Oeste (EO) y Norte-Sur (NS). Como resultado se obtuvieron 4 casos, C6mEO, C6mNS, C31mEO y C31mNS.

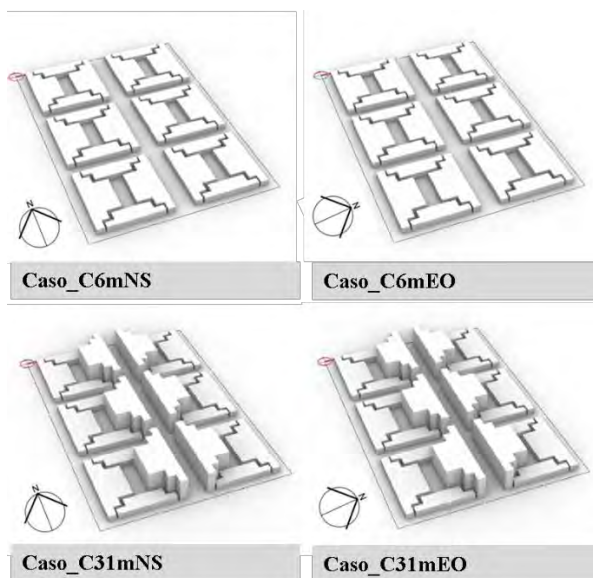


Figura 1. Escenarios C6m y C31m.

## Simulación microclimática

Para evaluar las condiciones microclimáticas de los escenarios morfológicos urbanos, se utilizó el modelo ENVI-met v5.0.2 a través del complemento Dragonfly

0.69, que permite transformar la geometría definida en Grasshopper a un formato entendible por el modelo. El tamaño del área es de 339,0m x 246,0m, y se definió a partir de una malla de  $dx = 5m$ ,  $dy = 5m$  y  $dz = 5m$ .

Para inicializar el modelo, se seleccionó el día 12 de febrero, comprendido en la semana extrema del período cálido, definida a partir del archivo climático EPW disponible en [climate.onebuilding.org](http://climate.onebuilding.org), registrado en el Aeropuerto de Carrasco (UY), en una serie histórica del 1958 al 2018. La simulación se inició a las 4am y se extendió por 72hs. Las 24hs iniciales se consideran para que el modelo se estabilice, por lo cual se sugiere descartarlas (DUARTE et al. 2015). Para la simulación se utilizó el método *Full Forcing*, a partir de las variables temperatura del aire, radiación solar y humedad relativa, del archivo EPW. A partir de la recomendación del equipo desarrollador del ENVI-met, no se forzó la velocidad y dirección del viento, por lo cual se definió un valor promedio a partir de los datos del archivo EPW, los cuales se mantienen constantes a lo largo de toda la simulación. Para velocidad del viento 2.2 m/s y dirección 135°.

Los materiales del entorno urbanos se definieron a partir de la base de datos propia del ENVI-met v5.0.2. Para las calles se utilizó *Asphalt Road (ID 0100ST)* con reflectancia de 0.20 y emisividad de 0.90. Para las veredas se utilizó *Concrete Pavment Gray (ID 0100PG)*, con reflectancia 0.50 y emisividad de 0.90. Ambas superficies cuentan con un perfil de suelo debajo de arcilla y arena *Sandy Loam (ID 0000SL)*. Las paredes y techos de los edificios se definen a partir de materiales que se agregaron a la base de datos, para lograr mejor concordancia con los materiales utilizados en Energyplus

## Simulación energética

Para el análisis energético se utilizó una tipología de edificio residencial simplificada, considerando de acuerdo con la normativa municipal la planta baja con características comerciales. Se utilizó el conjunto de herramientas de Ladybug 1.4 y Honeybee 1.4. con el motor de cálculo de Energyplus, ya que permiten utilizar la geometría generada anteriormente.

En este trabajo se optó por simplificar la zonificación interior del edificio para su estudio a partir de 4 zonas térmicas perimetrales, basado en el trabajo de Natanian (2020). Las paredes externas en contacto con edificios laterales se consideraron adiabáticas y las paredes internas se consideraron sólidas y sin intercambio de aire. Los materiales de piso, techo y paredes se definieron a partir del trabajo de Curto-Riso et al., (2021), donde analizan la distribución de viviendas por tipo, tamaño, nivel socioeconómico, antigüedad y región del Uruguay.

Los ambientes interiores se consideraron únicamente acondicionados artificialmente con un sistema de acondicionamiento del tipo *Ideal Loads* con temperatura de setpoint de 18°C para calefacción y 23°C para refrigeración. Se consideran únicamente cuando el ambiente está ocupado. El calor generado en el interior debido a la presencia de personas, sistemas de iluminación, equipos y su programación, se definieron a

partir del método de simulación propuesto en la NBR 15.57 (ABNT, 2013).

**Método de integración a través de Grasshopper**

Para la simulación energética integrada del edificio en Energyplus considerando las condiciones microclimáticas del entorno, se utilizaron los datos de salida del ENVI-met del día 13 de febrero. Los resultados de la simulación microclimática son cargados al ambiente de Grasshopper y son seleccionadas las tres variables a utilizar para la integración, temperatura y humedad relativa del aire y velocidad del viento. La temperatura del aire y la velocidad del viento se obtienen a partir de un promedio horario de los datos frente a la fachada del edificio (figura 2). La humedad relativa se obtiene a partir de un promedio horario de los datos dentro del cañón urbano a una altura de 2.5 metros.

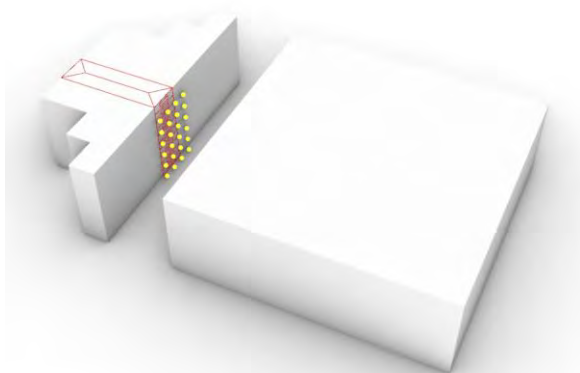


Figura 2. Datos de salida del ENVI-met frente a la fachada del edificio.

Las variables climáticas se modifican en el archivo climático EPW original (EPWo) y se conforma el archivo climático modificado (EPWm) que se utilizó para la simulación energética en Energyplus. Para conseguir que el modelo entre en régimen antes del día estudiado (13/2), se realizaron en total tres simulaciones microclimáticas en ENVI-met, para conformar una serie de datos microclimáticos de cinco días previos al día de estudio, desde el 8/2 al 13/2.

**Discusión y análisis de resultados**

La discusión se centró primeramente respecto a las variaciones microclimáticas observadas al modificar la morfología urbana. Posteriormente se analiza la variación de las cargas térmicas de refrigeración del edificio al considerar las variaciones microclimáticas en la simulación energética.

**Variaciones microclimáticas en el cañón urbano**

La figura 3 muestra una comparación de la temperatura del aire (Tar), humedad relativa (Hr) y velocidad del viento (Vv) en el cañón urbano durante el día 13 de

febrero, en los escenarios con edificaciones altas (C31m) y con edificaciones bajas (C6m).

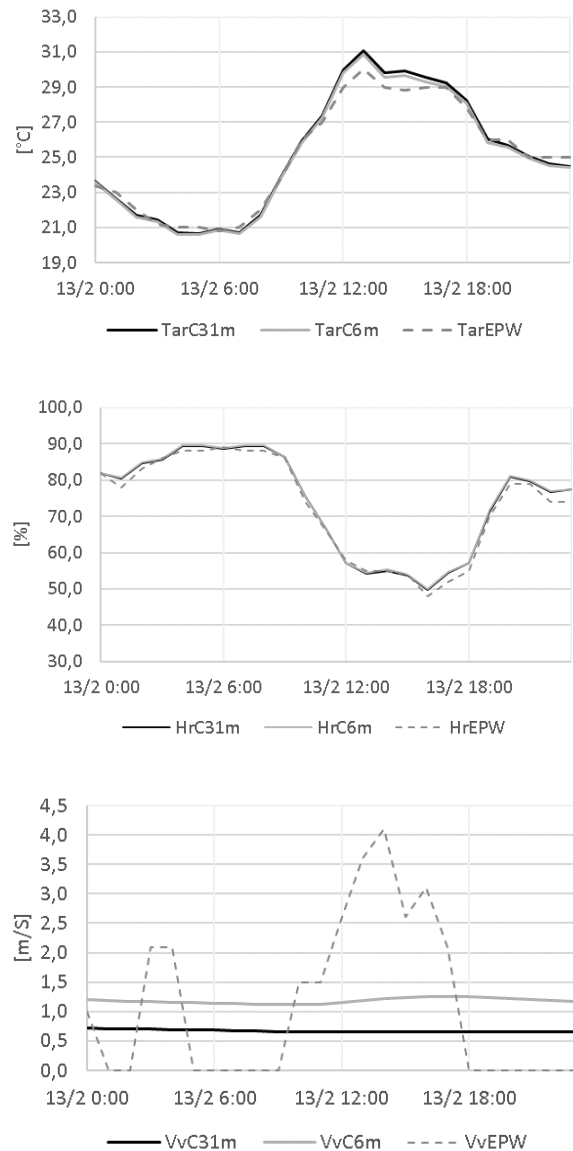


Figura 3. Temperatura del aire (Tar), humedad relativa (Hr) y velocidad del viento (Vv) registrada para o archivo EPW e los diferentes escenarios de densidad (C31m e C6m) en el cañón este-oeste.

Teniendo en cuenta la influencia del microclima urbano genera un aumento de hasta 1,1°C en la temperatura del aire en relación al archivo EPW. La temperatura del aire máxima del archivo EPW es de 30.0°C registrada a las 13hs. Los datos obtenidos de la simulación presentan una temperatura del aire máxima de 31.1°C y 30.9°C para los escenarios C31mEOPC y C6mEOPC respectivamente, también a las 13hs. Variaciones similares fueron observadas en el trabajo de Mosteiro-Romero et al. (2020), con temperaturas 0.7°C más bajas durante la noche y 1.2°C más altas durante el día, respecto a los datos climáticos base.



La comparación entre los escenarios de alta y baja densidad demuestra la mayor diferencia entre las 15hs y 16hs, en torno a 0.3°C, siendo mayor la temperatura del caso de 31 metros. En su trabajo Zhang and Gao (2021) observaron a partir de la comparación de escenarios con densidades diferentes, una variación menor a 1°C. Y contrariamente, identificaron que los escenarios con edificaciones más bajas presentan temperaturas del aire más altas, debido al mayor ingreso de radiación solar. Estos resultados confirman la baja variación de la temperatura del aire al modificar la forma urbana, pero también la necesidad de analizar otras configuraciones urbanas ya que los flujos del viento se ven modificados de forma significativa.

Durante la noche, también se observa que la temperatura del aire es levemente mayor en el cañón urbano con edificios de 31 metros. Esta tendencia se correlaciona con la relación de aspecto (relación de altura y ancho) de cada cañón urbano: cuanto mayor sea la relación de aspecto, mayor será la intensidad de UHI, como también se muestra en los resultados de estudios previos (NATANIAN et al., 2019).

Para la humedad relativa del aire, se observa que los escenarios simulados presentan su valor máximo una hora antes que el archivo EPW. El modelo no presentó diferencias significativas en la humedad relativa del aire para los escenarios de mayor y menor densificación. La simplificación del modelo, sin considerar por ejemplo vegetación urbana, podría estar asociado a estos resultados

Con respecto a la velocidad del aire, el archivo EPW muestra un Vv promedio diaria de 2.4m/s, con variaciones que alcanzando máximas de hasta 4.1m/s. Los escenarios simulados presentaron mayor estabilidad a lo largo del día, lo que se explica por el modo de simulación utilizado. El escenario con edificios de 31 metros presentó un promedio diario de 0.7m/s, sin variación a lo largo del día. El escenario con edificaciones de 6 metros presentó un promedio diario de 1.2m/s, con una leve variación de 0.1m/s. Se puede observar que el escenario con edificaciones bajas de 6 metros presentó velocidades del viento mayores, en torno a los 0.5m/s, respecto al caso con edificaciones de 31 metros. Siendo que para los dos casos se utilizó la misma velocidad del viento de inicialización, se puede observar la influencia de la variación de la forma urbana en la velocidad del viento.

La figura 4 muestra una comparación de la radiación solar directa ( $R_{sdir}$ ) en el cañón urbano durante el día 13 de Febrero, en los escenarios de mayor densidad (C31m) y menor densidad (C6m).

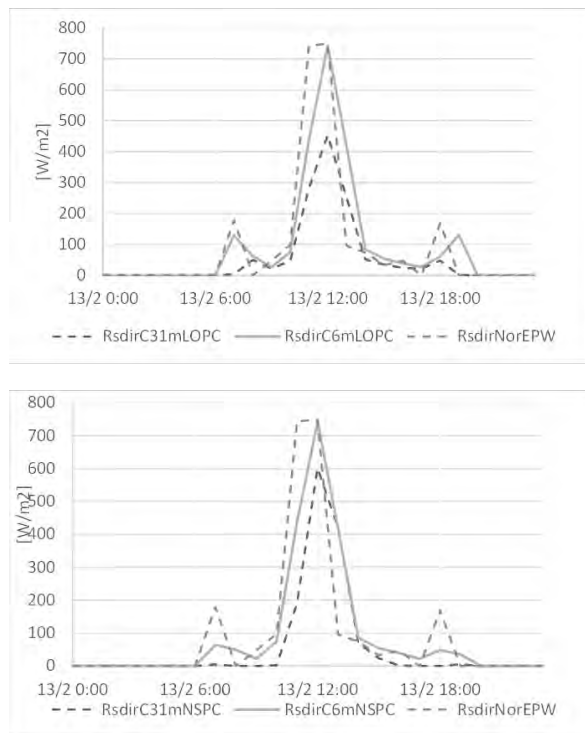


Figura 4. Radiación solar directa ( $R_{sdir}$ ) registrada para los diferentes escenarios de densidad (C31m e C6m) en los cañons este-oeste (arriba) y norte-sur (abajo).

Se observa a lo largo del día, que el primer escenario, con edificaciones altas de 31 metros presenta menores valores, alcanzando una máxima a las 12hs de 453.6 W/m<sup>2</sup>, mientras que con edificaciones de 6 metros 742.2 W/m<sup>2</sup>. También se observa que el primer escenario no recibe radiación solar directa dentro del cañón urbano hasta las 7am, mientras que el segundo comienza a recibir una hora antes, a las 6hs. Por lo tanto, respecto al promedio diario, el escenario con edificaciones de 31 metros recibe un 43% menos de radiación solar dentro del cañón urbano. El impacto de la orientación de la calle en el acceso solar también es notable. En el cañón este-oeste, la radiación solar directa está presente durante todo el día con picos de 749W/m<sup>2</sup> y 453.6W/m<sup>2</sup> a las 12hs, para los escenarios de mayor y menor densidad, respectivamente. En el cañón norte-sur, la radiación solar está presente todo el día para el escenario menos densificado, pero solo de 11am a 3pm para el escenario con edificios de 31 metros de altura, con un pico de 749W/m<sup>2</sup> al medio día. Estos resultados corroboran con el estudio de Zhang and Gao (2021) donde se observó una correlación negativa entre el aumento de la densificación urbana y la velocidad del viento y la radiación solar.

A partir de los gráficos presentados anteriormente, se puede identificar que la temperatura del aire, al igual que la humedad relativa, no presentaron grandes variaciones al modificar la altura de las edificaciones que conforman el cañón urbano. Así los resultados de la Tar concuerdan

con las observaciones de Sharmin et al. (2017), donde el ENVI-met muestra poca sensibilidad a los cambios morfológicos. Por otro lado, a pesar de la limitación del modo de simulación utilizado, donde no se utilizaron los datos de velocidad del viento horario del archivo EPW para inicializar la simulación, se puede observar que la velocidad del viento muestra cierta variación al modificar la altura de las edificaciones. De igual forma la radiación solar directa recibida dentro del cañón urbano, para la cual si se utilizaron los datos del archivo EPW para inicializar la simulación. Demostrando en la literatura, estas dos últimas variables, tener una influencia significativa en el desempeño energético de los edificios.

### Variación de las cargas térmicas

La Figura 5 muestra las cargas térmicas de refrigeración a partir de la simulación energética integrada para el día 13 de febrero modificando una a una las variables de archivo climático EPW, temperatura del aire (EPWm\_Tar), humedad relativa (EPWm\_Hr) y velocidad del viento (EPWm\_Vv).

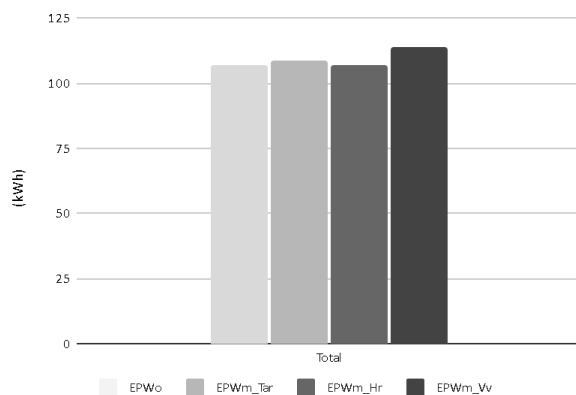


Figura 5. Análisis individual de variables climáticas simulación energética integrada del escenario C31mEOPC.

Si se analizan las cargas térmicas totales de refrigeración del edificio, considerando todos los pisos, se identifica un aumento de entorno al 8% (107 kWh para 115kWh) utilizando el archivo EPWm. Esto demuestra que la simulación integrada es sensible a las variaciones del microclima urbano modificando el comportamiento térmico de los edificios. Sin embargo, vale la pena enfatizar la importancia de incluir el proceso de validación del modelo de microclima a través de mediciones de campo (LIU et. al, 2021). La simulación que no tiene en cuenta el microclima tiende a subestimar el consumo energético por refrigeración de los edificios en climas cálidos (NATANIAN et al. 2019).

También se analizó la modificación de las variables climáticas de forma individual para evaluar la influencia de cada una en los resultados de carga térmica. Se observa que el cambio en la temperatura del aire (EPWm\_Tar) y ‘

velocidad del viento (EPWm\_Vv) aumenta la carga térmica del edificio en 1% y 6%, respectivamente. La influencia del microclima urbano genera un ligero aumento de la temperatura del aire en relación al archivo EPW original y, como consecuencia, una mayor demanda de energía para refrigeración de la edificación. Además, el archivo climático modificado presenta velocidad del viento menor y con más estabilidad a lo largo del día, lo cual explica en este caso el mayor aumento de la carga térmica, ya que modifica de forma significativa el coeficiente convectivo en las superficies exteriores. Lo cual de acuerdo con Liu et al., (2015) puede generar un incremento en el consumo de energía para refrigeración de hasta 4% por causa del coeficiente de transferencia de calor por convección.

Por otro lado, la modificación de la humedad relativa (EPWm\_Hr) no se traduce en diferencias en las cargas térmicas debido a que el modelo no presentó diferencias significativas en la humedad relativa del aire a lo largo del día. Pero de acuerdo con los resultados de Mosteiro-Romero et al. (2020) observó que la variación de la humedad relativa y la velocidad del viento influyen fuertemente en el aumento de las cargas de refrigeración latente.

Varios estudios observan que el potencial de ventilación natural en edificaciones en el cañón urbano se reduce de forma significativa por la reducción de la velocidad del viento que se produce dentro del cañón (SANTAMOURIS et al., 2001; GEORGAKIS; SANTAMOURIS, 2006).

### Conclusiones

Este estudio presenta un método de integración de las herramientas ENVI-met y Energyplus mediante Grasshopper para las simulaciones de desempeño de edificios con resultados que tienen el potencial de considerar cambios en el microclima en función del proceso de consolidación y verticalización urbana. Al final de la investigación se pudo concluir, confirmando resultados de otros trabajos sobre el mismo tema, que la configuración urbana tiene un impacto en los resultados del microclima y carga térmica de los edificios.

Con base en esto, el estudio comparativo demostró cómo y en qué medida la variación del microclima urbano impacta en el desempeño térmico de los edificios residenciales y muestra el aumento de la demanda de refrigeración. Se identificó que el entorno urbano no influye de igual manera en todas las variables microclimáticas, observadas en este estudio.

Al comparar los datos climáticos dentro del entorno urbano simulados con ENVI-met respecto a los datos registrados en la estación meteorológica fuera de la ciudad, se identificaron variaciones de hasta 1.1°C en la temperatura del aire, mientras que la humedad relativa no presentó variaciones significativas, lo cual responde por

ejemplo a que en este estudio no se consideró vegetación. Por otro lado, cuando se compara el escenario con edificaciones de 31m y de 6m sobre el cañón urbano, se identifica que la variación de la geometría no tiene mayor influencia sobre la temperatura del aire, ya que se observa un aumento leve de hasta 0.3°C.

Mientras que la geometría urbana presentó variaciones importantes en la velocidad del viento y en la radiación solar que ingresa en el cañón urbano. En el entorno urbano bajo, se observó que la velocidad del viento es 0.5m/s mayor respecto al entorno urbano alto. También se identificó una importante reducción de la radiación que ingresa en el cañón urbano a lo largo del día, de -44% (997.1w/m<sup>2</sup>), lo cual tiene una importante influencia en el desempeño energético de los edificios debido a la reducción de ganancias solares. Finalmente, al considerar las variaciones microclimáticas influenciadas por el entorno urbano, permiten identificar un aumento de las cargas térmicas de refrigeración de los edificios de entorno a +8% (8.4kWh).

Sin embargo, el presente trabajo está limitado por el uso de archivos climáticos. Por un lado, es necesario realizar el forzado de los datos horarios de velocidad y dirección del viento para la inicialización del modelo ENVI-met. Por otro lado, para obtener resultados más adecuados, es necesario utilizar los datos meteorológicos característicos de las áreas de estudio de caso, en lugar de los datos meteorológicos sinópticos como condiciones de contorno. Así también la importancia de calibrar el modelo para elaborar otros análisis morfológicos.

Las investigaciones futuras pueden utilizar este flujo de trabajo para analizar la influencia del entorno urbano en el balance energético del edificio considerando diferentes escenarios de acuerdo con el proceso de desarrollo urbano de la ciudad en cuestión para generar pautas de planificación urbana orientadas al clima.

## Referencias

- ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15575: Edificações habitacionais - Desempenho*. Rio de Janeiro, 2013.
- BALTER, J., ALCHAPAR, N., CORREA, E., & GANEM, C. (2021). Urban microclimatic modeling for apartment's thermo-energy simulation in high-rise buildings in Mendoza-Argentina. ENVI-met and EnergyPlus software integration. *Informes de La Construcción*, 73(561), 1–11.
- CURTO-RISO, P., PICCIÓN SÁNCHEZ, A., FAVRE SAMARRA, F., GERVAZ CANESSA, S., GALIONE KLOT, P., ROMERO BAREA, J., LÓPEZ SALGADO, M., PEREIRA RUCHANSKY, L., CAMACHO ROBERTS, M., & RODRÍGUEZ MUNOZ, J. (2021). *Eficiencia energética en el sector residencial. Situación actual y evaluación de estrategias de mejoramiento para distintas condiciones climáticas en el Uruguay*. Primer Reporte Técnico.
- DUARTE, D. H. S., SHINZATO, P., GUSSON, C. DOS S., & ALVES, C. A. (2015). The impact of vegetation on urban microclimate to counterbalance built density in a subtropical changing climate. *Urban Climate*, 14, 224–239.
- GEORGAKIS, C.; SANTAMOURIS, M. (2006) Experimental investigation of air flow and temperature distribution in deep urban canyons for natural ventilation purposes. *Energy and Buildings* 38, 4, 367–376.
- LIU, J., HEIDARINEJAD, M., GRACIK, S., & SREBRIC, J. (2015). The impact of exterior surface convective heat transfer coefficients on the building energy consumption in urban neighborhoods with different plan area densities. *Energy and Buildings*, 86, 449–463.
- LIU, Z.; CHENG, W; JIM, C.Y.; MORAKINYO, T.E.; SHI, Y.; NG, E. (2021) Heat mitigation benefits of urban green and blue infrastructures: A systematic review of modeling techniques, validation and scenario simulation in ENVI-met V4, *Building and Environment* 200, 107939.
- MOSTEIRO-ROMERO, M., MAIULLARI, D., PIJERS-VAN ESCH, M., & SCHLUETER, A. (2020). An Integrated Microclimate-Energy Demand Simulation Method for the Assessment of Urban Districts. *Frontiers in Built Environment*, 6.
- NATANIAN, J.; ALEKSANDROWICZ, O.; AUER, T. (2019) A parametric approach to optimizing urban form, energy balance and environmental quality: The case of Mediterranean districts. *Applied Energy* 254, 113637.
- NATANIAN, J. (2020). *Beyond zero energy districts a holistic energy and environmental quality evaluation workflow for dense urban contexts in hot climates* [PhD]. Technical University of Munich.
- SANTAMOURIS, M.; CARTALIS, C.; SYNNEFA, A.; KOLOKOTSA, D. (2015) On the impact of urban heat island and global warming on the power demand and electricity consumption of buildings—A review. *Energy and Buildings* 98, 119–124.
- SANTAMOURIS, M.; PAPANIKOLAOU, N.; LIVADA, I.; KORONAKIS, I.; GEORGAKIS, C.; ARGIRIOU, A; ASSIMAKOPOULOS, D.N. (2001) On the impact of urban climate on the energy consumption of building. *Solar Energy* 70 (3), 201–216.
- SHARMIN, T., STEEMERS, K., & MATZARAKIS, A. (2017). Microclimatic modelling in assessing the impact of urban geometry on urban thermal environment. *Sustainable Cities and Society*, 34, 293–308.
- TSOKA, S.; TOLIKA, K.; THEODOSIOU, T.; TSIKALOUDEKI, K.; BIKAS, D. (2018) A method to account for the urban microclimate on the creation

of ‘typical weather year’ datasets for building energy simulation, using stochastically generated data. *Energy and Buildings* 165, 270–283.

United Nations Environment Programme (2020). *Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*.

YANG, X.; ZHAO, L.; BRUSE, M.; MENG, Q. (2012) An integrated simulation method for building energy performance assessment in urban environments. *Energy and Buildings* 54, 243–251.

ZHANG, M.; GAO, Z. (2021) Effect of urban form on microclimate and energy loads: Case study of generic residential district prototypes in Nanjing, China. *Sustainable Cities and Society* 70, 102930.

## Modelo matemático simplificado para el cálculo del requerimiento energético a partir de simulaciones paramétricas.

María Victoria Mercado<sup>1</sup>, Gustavo Barea<sup>1</sup>, Andres Aceña<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Ambiente Hábitat y Energía, CCT MZA CONICET, Mendoza, Argentina

<sup>2</sup>Instituto Interdisciplinario de Ciencias Básicas, CONICET, FCEN UNCuyo, Mendoza, Argentina

### Abstract

Se describe el desarrollo de un modelo matemático predictivo que otorga un primer acercamiento al valor de requerimiento energético (RE) de un edificio residencial en un clima templado continental. Se utilizaron resultados de simulaciones realizadas con Energy Plus 9.5 y JePlus, como data set para el armado del modelo propuesto. El objetivo busca aportar al conocimiento teórico de herramientas de evaluación energética. El análisis matemático se realizó utilizando el programa SageMath, para desarrollar ecuaciones que predicen el RE de cada escenario. Este modelo busca incorporar la precisión y validez de las simulaciones dinámicas, a una herramienta de predicción sencilla y aplicable por usuarios para la toma de decisiones de diseño.

### Introducción

La tecnología destinada a mejorar el hábitat humano avanza rápidamente, sin embargo, no todos estos avances están orientados a la sustentabilidad o la eficiencia energética de los edificios (Behling & Behling, 2002). El diseño bioclimático permite sentar bases firmes en un proyecto de arquitectura para que propicie el ahorro energético y el correcto uso de los recursos. Las variables con las que se debe trabajar son bien conocidas y existen numerosos trabajos que las estudian en profundidad, donde se ha indagado sobre la influencia de cada uno en el requerimiento energético total (RE) de una vivienda como lo son: la orientación, la forma, la calidad térmica de la envolvente y la relación entre superficie opaca y superficie translúcida (Hachem et al, 2011-2012; Looenen et al, 2013; Lee et al, 2016; Rini et al, 2017). Timucin y Wilde advierten que debe prestarse más atención a la investigación holística de todos estos factores para el logro de la eficiencia energética (Timucin y Wilde, 2021). Dado que la energía generada durante la fase de operación de un edificio representa más del 90% de la energía generada a lo largo del ciclo de vida del edificio, las predicciones precisas del consumo de energía son fundamentales para ahorrar energía en el sector de la construcción (Chang et al 2019).

Las predicciones del consumo de energía de los edificios generalmente se calculan utilizando modelos basados en la física y/o en modelos basados en mediciones in situ (datos) (Kim et al, 2022x). Para el cálculo de los modelos basados en la física, se realizan con software de simulación como EnergyPlus, Design Building, TRNSYS entre otros. Esta metodología se ha empleado en numerosos trabajos ya que proporcionan resultados muy

confiables y proporcionan la posibilidad de analizar las causales de los resultados (Fumo et al, 2010; Bhandari et al, 2012; Naji et al, 2014; Chargui et 2014; Fathalian and Kargarsharifabad, 2018). Sin embargo, para simular comportamientos energéticos, es necesario disponer de una cantidad considerable de información específica sobre el edificio, sumado a que dicha metodología requiere mucho tiempo y recursos informáticos actualizados y de alta prestación (Kwak et al, 2013; Zhao and Magoules, 2012).

Las metodologías usadas para la obtención de resultados de fenómenos dinámicos, utilizan mediciones in situ, que luego se procesan para obtener patrones descriptivos estadísticos (Wei et al, 2018). No obstante, diversos estudios se han centrado en predicciones de estos mismos fenómenos con técnicas de análisis en laboratorios, sin recurrir a los datos in situ (Chammas et al, 2019; Chou and Ngo, 2016; Gozález et al, 2017).

En el marco de la problemática abordada, se propone un modelo simplificado para el cálculo predictivo del consumo energético anual, para edificios residenciales en condiciones de clima templado continental (Mendoza, Argentina), a partir del conocimiento del área vidriada, los materiales de la envolvente, la orientación y la tipología edilicia. De este modo, el objetivo del presente trabajo busca aportar al conocimiento teórico de herramientas de evaluación energética, sin la necesidad de recurrir a entornos de simulación con la complejidad que eso conlleva.

### Metodología



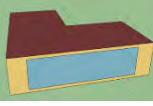
El trabajo se divide en tres etapas secuenciales, a-Identificar las variables a utilizar y establecer sus rangos; b-Realizar las simulaciones para el clima actual de la ciudad de Mendoza y c-Construcción de los modelos matemáticos y su evaluación.

#### a. Variables y rangos

Como variables de estudio, se utilizaron las consideradas como determinantes en el diseño arquitectónico en las primeras fases del mismo siendo: la forma, la orientación, la relación de ventanas y muros opacos y la materialidad de muros y techos. En un trabajo anterior (Mercado et al, 2018) se estableció un orden jerárquico al que se debía atender para la reducción del RE. De este estudio se

desprendió la necesidad de hacer más simple y fácil el acceso a un primer indicio del desempeño energético del proyecto. Por lo que las variables a utilizar son las mismas pero se ampliaron los rangos de trabajo de cada una. La tabla 1 presenta las variables categorizadas, los rangos y su denominación en los modelos matemáticos.

Table 1: Variable consideradas para el estudio

Variable discreta			
Tipología de forma	C - cuadrado	R - rectangular	L - forma esquina
			
IC (índice de compacidad)	88.6%	82.6%	75.5%
FAEP (factor de forma de la envolvente)	2.17	2.25	2.37
Variables continuas			
v-Factor WWR (factor de relación entre aberturas de ventanas y muro opaco)	20 - 30 - 40 - 50 - 60 - 70 - 80 - 90 - 100		
w-orientación	0 - 15 - 30 - 45 - 60 - 75 - 90 - 105 - 120 - 135 - 150 - 165 - 180 - 195 - 210 - 225 - 240 - 255 - 270 - 285 - 300 - 315 - 330 - 345 - 360		
x-espesor aislamiento muros (Material considerado EPS: poliestireno expandido)	0.01 - 0.02 - 0.03 - 0.04 - 0.05 - 0.06 - 0.07 - 0.08 - 0.09 - 0.10 - 0.11 - 0.12 - 0.13 - 0.14 - 0.15 - 0.16 - 0.17 - 0.18 - 0.19 - 0.20		
y-espesor aislamiento techos (Material considerado EPS: poliestireno expandido)	0.01 - 0.02 - 0.03 - 0.04 - 0.05 - 0.06 - 0.07 - 0.08 - 0.09 - 0.10 - 0.11 - 0.12 - 0.13 - 0.14 - 0.15 - 0.16 - 0.17 - 0.18 - 0.19 - 0.20		

### b. Simulaciones computacionales paramétricas

Para las simulaciones se utilizó el programa Energy Plus 9.2 y Jeplus para las simulaciones paramétricas. Estas se realizaron con la combinación simultánea de todas las

<sup>1</sup> FAEP, factor de forma de la envolvente y pisos (Esteves y Gelardi, 2003)

variables permitiendo la interrelación entre ellas, alcanzando un número total de 270000 simulaciones. Se utilizó el archivo climático TRY de la ciudad de Mendoza, obtenido de la página one building (<http://climate.onebuilding.org>) para el clima presente en base al período 2003-2017.

Se modelaron tres edificios diferentes como se observa en la Tabla 1, uno de forma cuadrada, otro de forma rectangular y el tercero de forma L, ejemplificando diversas opciones de compacidad de mayor a menor respectivamente. También se calculó el FAEP<sup>1</sup> (Factor de forma envolvente/piso), siendo mayor a medida que la forma se abre o pierde compacidad. Cada modelo se trabajó como una sola zona térmica de 80m<sup>2</sup>. En la materialización se tomó como referencia el sistema de construcción tradicional y másico, siendo, para muros: ladrillo cerámico másico, revoque en ambos lados y aislamiento térmico; y para techos: losa de hormigón alivianada, mortero para pendiente, membrana asfáltica y aislamiento térmico. La variabilidad de los paquetes constructivos se trabaja modificando los espesores de aislamiento térmico, utilizando como tal EPS (poliestireno expandido) en muros y techos. Se establecieron termostatos relacionados a los parámetros de confort de Olgay, para invierno se fijó en 20°C y para verano 24°C. No se consideraron sistemas HVAC, por lo que se trabaja con los requerimientos energéticos de carga ideal para el año completo. En el presente trabajo se utilizó el dato del requerimiento energético total de acondicionamiento, es decir la suma de los requerimientos energéticos para calefacción y para refrigeración.

### c. Construcción de modelos matemáticos

Los resultados de las simulaciones se utilizaron como Data-set de entrada en el software SageMath para la construcción de los análisis estadísticos y los modelos matemáticos que permitan, a partir de un conjunto de ecuaciones, predecir el consumo de energía de cada escenario de diseño.

Se buscó un equilibrio entre la obtención de un modelo matemático fino y el modelo estadístico que se acercara al valor de referencia.

Así, cada modelo matemático es una ecuación donde las variables independientes son las variables continuas (v,w,x,y), y que contiene parámetros que se fijan a través de un ajuste de cuadrados mínimos, utilizando para esto las simulaciones anteriores. Una vez determinados los parámetros en la ecuación, esta puede usarse para predecir el consumo energético del edificio reemplazando las variables continuas por el valor correspondiente del edificio en cuestión. Se desarrollaron un total de 40

modelos matemáticos, intentando que los modelos no fueran innecesariamente complicados. También se consideró la realidad física de las variables involucradas, como que la orientación es una variable angular periódica.

El data-set construido con las simulaciones no sólo permite determinar los parámetros de mejor ajuste para el modelo, sino que también nos permite obtener los errores que cada modelo tiene, y por lo tanto decidir qué modelo funciona mejor en términos de su valor predictivo. Es importante notar que cuanto más parámetros tiene un modelo, en general menos errores va a tener, sin embargo se cae en el riesgo del “overfitting”. Para evitar esto se prefirieron los modelos que tenían errores que no decrecían sustancialmente al aumentar el número de parámetros.

## Resultados

De los resultados obtenidos se exploraron diferentes modelos que permitieron hacer una aproximación a una ecuación genérica sencilla. Estos se analizaron en dos sentidos. Uno, la ecuación, su forma y desarrollo en cuanto a cantidad y representatividad de los parámetros involucrados y Dos, a partir del error como objeto de diagnóstico de la efectividad del modelo.

Los modelos se dividen por familia vinculados a mismas hipótesis asumidas, de cada una se eligió el mejor modelo, realizando suposiciones respecto del modelo seleccionado como óptimo (Ec. 1).

De los 40 modelos explorados, se considera que hay 3 que se destacan, debido a que, a- los errores en las predicciones obtenidas están acotados, b- el número de parámetros no lleva al overfitting y c- permiten analizar el comportamiento del consumo energético en términos de las variables incluidas.

Se exponen a continuación cada uno:

### Modelo 1 [M1]

$$Co(v, w, x, y) = F + F_v v + F_x \frac{1}{x} + F_y \frac{1}{y} \quad (1)$$

Donde:

$$F_i = A_i + B_i \cos\left(\frac{\pi}{180} w\right)$$

Este modelo cuenta con 8 parámetros, los valores de los mismos para cada forma, obtenidos del ajuste ,se presentan en la Tabla 2.

Table 2: Valores de los parámetros para el Modelo 1

Modelo 1	C	L	R
----------	---	---	---

A	10633.1	2190.61	5093.01
B	-128.62	-250.7	-442.29
Av	-17.49	-4.49	-5.33
Bv	-14.67	-6.56	-12.09
Ax	14.76	10.7	12.97
Bx	1.79	1.49	2.34
Ay	2.09	4.97	3.9
By	5.94	1.96	3.75

### Modelo 2 [M2]

$$Co(v, w, x, y) = F + F_w \cos\left(\frac{\pi}{180} w\right) + F_v v + F_x \frac{1}{x} + F_y \frac{1}{y} + F_{ww} \cos^2\left(\frac{\pi}{180} w\right) + F_{vv} v^2 + F_{xx} \frac{1}{x^2} + F_{yy} \frac{1}{y^2} + F_{wv} \cos\left(\frac{\pi}{180} w\right) v + F_{wx} \cos\left(\frac{\pi}{180} w\right) \frac{1}{x} + F_{wy} \cos\left(\frac{\pi}{180} w\right) \frac{1}{y} + F_{vx} v \frac{1}{x} + F_{vy} v \frac{1}{y} + F_{xy} \frac{1}{xy} \quad (2)$$

Este modelo utiliza 15 parámetros, los valores ajustados de los mismos se presentan en la Tabla 3.

Table 3: Valores de los parámetros para el Modelo 2

Modelo 2	C	L	R
F	11226.94	2459.96	5834.87
Fw	-128.62	-250.7	-442.29
Fv	-35.09	-14.09	-29.29
Fx	5.28	8.44	6.76
Fy	-6.28	4.61	2.91
Fww	40.69	-8.89	-148.99
Fvv	0.11	0.06	0.17
Fxx	-0.02	-0.03	-0.05
Fyy	0.01	-0.03	-0.04
Fwv	-14.67	-6.56	-12.09
Fwx	1.79	1.49	2.34
Fwy	5.94	1.96	3.75
Fvx	0.16	0.07	0.17
Fvy	0.09	0.04	0.06
Fxy	0.12	0.07	0.05

### Modelo 3 [M3]

$$Co(v, w, x, y) = F + F_v v + F_x \frac{1}{x} + F_y \frac{1}{y} + F_{vv} v^2 + F_{xx} \frac{1}{x^2} + F_{yy} \frac{1}{y^2} + F_{vx} \frac{v}{x} + F_{vy} \frac{v}{y} + F_{xy} \frac{1}{xy} \quad (3)$$

Donde:

$$F_i = A_i + B_i \cos\left(\frac{\pi}{180} w\right)$$

Los valores de los parámetros se presentan en la Tabla 4, en este caso se utiliza un total de 20.

Table 4: Valores de los parámetros para el Modelo 3

Modelo 3	C	L	R
A	11247.28	2455.51	5760.38
B	-197.85	-105.05	-16.54
Av	-35.09	-14.09	-29.29
Bv	-13.03	-13.39	-29.96
Ax	5.28	8.44	6.76
Bx	2.33	2.29	2.32
Ay	-6.28	4.61	2.91
By	8.97	3.49	5.35
Avv	0.11	0.06	0.17
Bvv	-0.03	0.05	0.14
Axx	-0.02	-0.03	-0.05
Bxx	-0.02	-0.01	-0.01
Ayy	0.01	-0.03	-0.04
Byy	-0.07	-0.02	-0.04
Avx	0.16	0.07	0.17
Bvx	0.03	0.01	0.03
Avy	0.09	0.04	0.06
Bvy	0.07	0.02	0.04
Axy	0.12	0.07	0.05
Bxy	-0.01	-0.01	-0.01

Respecto al valor predictivo de cada modelo, en la tabla 5 se presentan los errores absolutos y errores relativos entre el modelo matemático y la predicción de las simulaciones para la forma C, análogamente en las tablas 6 y 7 para la forma L y R. Se presentan las diferencias máximas, mínimas, y la desviación estándar en las diferencias.

Table 5: Medidas de Errores, Min, Max y Std (desviación estándar) absolutas y relativas para la forma cuadrada.

Forma C	Errores absolutos			Errores relativos		
	Min	Max	Std	Min	Max	Std
M1	-1693	726	183	-0.14	0.07	0.02
M2	-801	897	125	-0.06	0.08	0.01
M3	-521	899	118	-0.05	0.08	0.01

Table 6: Medidas de Errores, Min, Max y Std (desviación estándar) absolutas y relativas para la forma rectangular.

Forma R	Errores absolutos			Errores relativos		
	Min	Max	Std	Min	Max	Std
M1	-1304	735	189	-0.19	0.17	0.04
M2	-551	1038	110	-0.08	0.14	0.02
M3	-597	980	104	-0.09	0.18	0.02

Table 7: Medidas de Errores, Min, Max y Std (desviación estándar) absolutas y relativas para la forma esquina.

Forma L	Errores absolutos			Errores relativos		
	Min	Max	Std	Min	Max	Std
M1	-875	352	103	-0.21	0.17	0.05
M2	-362	564	72	-0.16	0.14	0.04

M3	-347	538	67	-0.14	0.14	0.03
----	------	-----	----	-------	------	------

De los modelos seleccionados se muestra cuánto se desvía el valor predicho por la ecuación y el valor referencia en porcentaje. Por ejemplo, en el modelo M2 para la forma C el valor de RE predicho por el modelo tiene una desviación estándar del 1.2%. En relación a los valores de error mínimo y máximo corresponden al porcentaje de error que se puede producir cuando la ecuación del modelo otorgue un menor consumo (error Min) o un mayor consumo (error Max) en relación a la referencia. En continuación con el ejemplo del modelo M2, el error puede variar un 6% dando un valor menor de RE y un 8% otorgando un valor mayor de RE.

## Discusión

Se considera importante destacar el hecho de que el modelado matemático presenta un camino ventajoso para la predicción del RE. Si bien, utilizar 20 parámetros puede parecer excesivo, esto contrasta con el tiempo, recursos y experticia que son necesarios para realizar las 270.000 simulaciones que alimentaron el modelo.

Como se observa en el análisis de errores, en todos los casos los mismos son aceptables, y en general el error relativo está restringido por debajo del 2.1%. Respecto al número de parámetros, si bien se obtiene una mejora sustancial del modelo al pasar del M1 (8 parámetros) al M2 (15 parámetros), cuando se pasa del M2 al M3 (20 parámetros) ya no hay una mejora significativa. Si bien no se han presentado los otros modelos considerados, de ese análisis parecería que tener más de 20 parámetros en el modelo no reporta ventajas predictivas y sí es posible caer en el overfitting.

Otro punto a destacar, de la consideración de los modelos no presentados, es que la elección de la forma funcional del modelo impacta fuertemente en la capacidad predictiva. Así, si en lugar de considerar como variables  $1/x$  y  $1/y$  se consideran directamente  $x$  y  $y$ , entonces los errores crecen considerablemente. Lo mismo para la dependencia angular en  $w$ .

El hecho de que haya una mejora al pasar del modelo 1 al 2 muestra que yendo a modelos no lineales puede ser un paso en la dirección correcta, aunque se pueden conseguir predicciones razonables sólo con el modelo lineal. El hecho de utilizar un modelo no lineal también permite sacar conclusiones respecto a la importancia de las distintas variables, no sólo por sí mismas, sino también en sinergia con las demás variables. Para discutir este punto se selecciona el M2, que parece el modelo más exitoso de la búsqueda realizada en este trabajo. En la Tabla 8 se presentan los parámetros de este modelo, como se hizo en la Tabla 2, con la salvedad que se ha normalizado teniendo en cuenta el rango de la variable asociada. Es decir, se presenta el cambio que produce esa variable en el consumo cuando se va de un extremo a otro de su rango.



Esto permite ver claramente la importancia de cada término en el consumo energético. Lo primero que se nota es que el grueso del consumo viene del parámetro F, o sea, la constante en el modelo, que no depende de ninguna de las variables. Es también de importancia que la constante más baja se obtiene para la forma L, lo que resalta el hecho de que el diseño arquitectónico tiene un impacto sustancial en el consumo energético. Sobre esta base de consumo, la dependencia angular dada por  $F_w$  y  $F_{ww}$  no es sustancial. El siguiente término a resaltar es  $F_v$ , que da la contribución de la proporción de superficie vidriada. Vemos que este término es siempre importante y negativo, lo que indica que el aumento de la superficie vidriada lleva a una reducción en el consumo. Acá sin embargo vemos que  $F_{vv}$ , el término cuadrático en la superficie vidriada, lleva a un aumento del consumo, aunque considerablemente menor que el ahorro por el término lineal. Si continuamos analizando por variables individuales, vemos que por sí mismas tanto el espesor de la aislación del techo como de los muros van por detrás de las otras variables, es decir tienen un impacto menor en el consumo. El término cruzado de mayor importancia es  $F_{vw}$ , el cual además es negativo. El resto de los términos son de importancia intermedia, lo que muestra que, si bien hay factores a resaltar, el sobresimplificar el modelo y las consideraciones de diseño son detrimentales.

Al tomar decisiones constructivas, el consumo energético es uno de los factores a considerar dentro de otros, como costo, disponibilidad de materiales, impacto ambiental de esos materiales, disponibilidad de terreno, etc. Dentro de ese análisis, el contar con un modelo predictivo como el presente, simplifica considerablemente la toma de decisiones, y principalmente su mejor característica es que permite que esas decisiones se tomen sobre consideraciones cuantitativas.

Table 8: Valores de los parámetros para el Modelo 2

Modelo 2	C	L	R
F	11227	2460	5835
F <sub>w</sub>	-257	-501	-885
F <sub>v</sub>	-3509	-1409	-2929
F <sub>x</sub>	528	844	676
F <sub>y</sub>	-628	461	291
F <sub>ww</sub>	41	-9	-149
F <sub>vv</sub>	1099	631	1660
F <sub>xx</sub>	-215	-350	-474
F <sub>yy</sub>	89	-328	-358
F <sub>wv</sub>	-2934	-1312	-2418
F <sub>wx</sub>	357	298	468
F <sub>wy</sub>	1188	391	750
F <sub>vx</sub>	1560	740	1653
F <sub>vy</sub>	887	389	596
F <sub>xy</sub>	1217	662	477

#### a. Uso del modelo en un ejemplo de diseño

Como se ha expuesto anteriormente, en los primeros pasos de diseño, el proyectista toma decisiones sobre las

variables consideradas en el estudio. Por lo que suponemos el proyecto de una vivienda con determinadas características presentadas en la tabla 9.

Table 9: Variables asumidas para un proyecto de vivienda, Caso n.

Forma	L
v -WWR	40%
w - orientación	0 (Norte)
x - espesor aislación muro	0.01(sistema constructivo sin aislación)
y - espesor aislación techo	0.05

Con las variables de la Tabla 9, y utilizando el Modelo 1, (considerado como óptimo), se obtiene el Requerimiento Energético total. Para esto el primer paso es obtener los valores de F, F<sub>v</sub>, F<sub>x</sub> y F<sub>y</sub> para w=0:

$$\begin{aligned}
 F &= A + B \cos\left(\frac{\pi}{180} w\right) = 2190.6 - 250.7 \cos\left(\frac{\pi}{180} 0\right) \\
 &= 1939.9 \\
 F_v &= A_v + B_v \cos\left(\frac{\pi}{180} w\right) = -4.49 - 6.56 \cos\left(\frac{\pi}{180} 0\right) \\
 &= -11.05 \\
 F_x &= A_x + B_x \cos\left(\frac{\pi}{180} w\right) = 10.7 + 1.49 \cos\left(\frac{\pi}{180} 0\right) \\
 &= 12.19 \\
 F_y &= A_y + B_y \cos\left(\frac{\pi}{180} w\right) = 4.97 + 1.96 \cos\left(\frac{\pi}{180} 0\right) \\
 &= 6.93
 \end{aligned}$$

Con estos valores se reemplaza en la ecuación del modelo:

$$\begin{aligned}
 Co(v, w, x, y) &= F + F_v v + F_x \frac{1}{x} + F_y \frac{1}{y} \\
 &= 1939.9 - 11.05 \times 40 + 12.19 \frac{1}{0.01} \\
 &\quad + 6.93 \frac{1}{0.05} = 2855.5
 \end{aligned}$$

Con lo que se obtiene un valor de REt caso n = 2855.5 W/m<sup>2</sup>

Este valor permitirá considerar cambios y mejoras en el proyecto, como por ejemplo: aumentar la aislación en muros y techos, llevando a los valores x=0.1 y y=0.1, y reducir la proporción de aberturas a un 30%. Esto daría un valor de REt caso n mejorado = 1799.6 W/m<sup>2</sup>.

## Conclusiones

Se alcanzan ecuaciones representativas del requerimiento energético para cada forma. Como se advierte en la introducción el objetivo de estas es una primera y rápida aproximación al desempeño energético de una vivienda, el cual se considera alcanzado.

Se destaca, además, que el uso de estos modelos matemáticos simplificados, es factible la independización

de equipamiento costoso y numerosas horas de uso para una aproximación del requerimiento energético en las primeras instancias del proyecto. Se presenta como una oportunidad de entender el comportamiento energético de un edificio en las primeras etapas de diseño arquitectónico, permitiendo entender a su vez, la incidencia de las decisiones de proyecto asumidas.

La ejemplificación por medio de un caso hipotético permitió demostrar la utilidad de un modelo de rápida respuesta para la toma de decisiones en el desarrollo del proyecto arquitectónico.

## References

- A. Fathalian, H. Kargarsharifabad (2018). Actual validation of energy simulation and investigation of energy management strategies (case study: an office building in Semnan, Iran). *Case Stud. Therm. Eng.*, 12.
- A. González-Vidal, A.P. Ramallo-González, F. Terroso-Sáenz, A. Skarmeta (2017). Data driven modeling for energy consumption prediction in smart buildings. *Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Big Data, Big Data*.
- C.C. Chang, W. Shi, P. Mehta, J. Dauwels. Life cycle energy assessment of university buildings in tropical climate. *J. Clean. Prod.*, 239 (2019), Article 117930, 10.1016/j.jclepro.2019.117930
- H. Zhao, F. Magoulès (2012). A review on the prediction of building energy consumption. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16.
- J. Chou, N. Ngo (2016). Time series analytics using sliding window metaheuristic optimization-based machine learning system for identifying building energy consumption patterns *Appl. Energy*, 177
- Jiwon Kim, Younghoon Kwak, Sun-Hye Mun, Jung-Ho Huh (2022). Electric energy consumption predictions for residential buildings: Impact of data-driven model and temporal resolution on prediction accuracy, *Journal of Building Engineering*, Vol. 62.
- M. Bhandari, S. Shrestha, J. New. (2012). Evaluation of weather datasets for building energy simulation. *Energy Build.*, 49.
- M. Chammas, A. Makhoul, J. Demerjian (2019). An efficient data model for energy prediction using wireless sensors. *Comput. Electr. Eng.*, 76.
- N. Fumo, P. Mago, R. Luck. (2010). Methodology to estimate building energy consumption using EnergyPlus Benchmark Models. *Energy Build.*, 42.
- R. Chargui, H. Sammouda. (2014). Modeling of a residential house coupled with a dual source heat pump using TRNSYS software. *Energy Convers. Manag.*, 81 pp. 384-399.
- S. Naji, O.C. Çelik, U.J. Alengaram, M.Z. Jumaat, S. Shamshirband. (2014). Structure, energy and cost efficiency evaluation of three different lightweight construction systems used in low-rise residential buildings. *Energy Build.*, 84.
- Y. Kwak, D. Seo, C. Jang, J. Huh (2013). Feasibility study on a novel methodology for short-term real-time energy demand prediction using weather forecasting data. *Energy Build.*, 57 pp. 250-260.
- Y. Wei, X. Zhang, Y. Shi, L. Xia, S. Pan, J. Wu, M. Han, X. Zhao (2018). A review of data-driven approaches for prediction and classification of building energy consumption. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 82.

## AJUSTE DE MODELO MATEMÁTICO DETED® POR MEDIO DEL ESTUDIO TÉRMICO DE UN EDIFICIO SIMPLE CON ENERGY PLUS

María Victoria Mercado<sup>1</sup>, Julieta Balter<sup>1</sup>, Hector Piriz<sup>2</sup>

<sup>1</sup>INAHE CCT MZA CONICET, Mendoza, Argentina

<sup>2</sup>Friolatina, Mendoza, Argentina

### Abstract

Ante el creciente desarrollo de herramientas de simulación energética edilicia, resulta importante encontrar un equilibrio entre la complejidad de los modelos y el tiempo computacional, teniendo en cuenta los objetivos y las entradas disponibles. Este trabajo presenta el desarrollo de un modelo matemático computacional -DETED®- en contraste con los resultados por simulación dinámica -EnergyPlus-. Se evaluaron dos escenarios y se obtuvo un  $\Delta T$  entre los modelos de 0.95°C en las temperaturas máximas. Las diferencias entre ambos modelos -del 4.7%- ha permitido observar rápidamente las diferencias generales y puntuales e identificar sus posibles causas. Se prevé continuar profundizando el análisis y optimizar el modelo.

### INTRODUCCIÓN

En los últimos años se han desarrollado una gran cantidad de herramientas de simulación energética edilicia (BES por su sigla en inglés *Building Energy Simulation*) con distintos enfoques y grados de detalle. Sin embargo, aumentar la complejidad del modelo generalmente aumenta el tiempo de modelado y la cantidad de entradas requeridas, lo que no siempre conduce a una mayor precisión. Por lo tanto, es importante encontrar el compromiso entre la complejidad del modelo y el tiempo computacional teniendo en cuenta el propósito y la meta del estudio de simulación y las entradas disponibles (Magni et al., 2022).

Asimismo, existen muchas investigaciones de análisis de sensibilidad sobre la influencia de las variables de entrada en los resultados de simulaciones edilicias y HVAC. Al respecto, los trabajos de Tiang (2013) y Pang et al. (2020) han realizado revisiones exhaustivas sobre el tema donde se discute la aplicación de los diferentes métodos, así como la determinación de las variables de entrada, la elección de los programas y los métodos para reducir el tiempo de cálculo de los modelos, entre otros aspectos.

Entre los antecedentes de trabajos que contrastan diferentes métodos de simulación, podemos citar el de Magni et al. (2022) en donde se implementan diferentes enfoques de modelado (de zona térmica, de ventana, masa térmica, etc.) utilizando un modelo de Simulink con validación cruzada de una celda de oficina y la influencia de cada variable analizada en los resultados horarios. Los resultados arrojaron una buena relación en términos de balance de energía y temperatura operativa en el centro de una zona térmica, sin embargo, se observaron desviaciones en las temperaturas en una ubicación específica de la zona. Además, se advirtió que un modelo de zona térmica simplificado permite ahorros importantes en términos de tiempo computacional, pero conduce a desviaciones en el comportamiento dinámico.

La decisión de utilizar o no un modelo simplificado depende en gran medida de los objetivos de la simulación. Es importante también la experiencia del calculista, en relación a la interpretación física conceptual de cada problema. Esto es, hallar las hipótesis simplificativas correctas que logren el mejor compromiso entre dos extremos: “Usar un cañón para matar un mosquito” versus un modelo básico que conduzca a resultados muy desviados de la realidad. El mejor elemento de comparación será siempre el resultado de ensayos físicos reales y es la referencia óptima a seguir para hallar el compromiso en la complejidad del modelo matemático. Los ensayos físicos no siempre pueden realizarse en los tiempos requeridos, motivo por el cual se recurre a tomar como patrón de referencia un programa confiable suficientemente validado y contrastado con ensayos físicos reales. Este último, es el método que se utiliza para contrastar la primera versión del programa DETED®.

Este trabajo, presenta el análisis y la estructura del modelo matemático computacional DETED® (DEsempeño Térmico EDificios) desarrollado por la oficina de investigación de desarrollo de la empresa Friolatina del grupo LTN<sup>1</sup> con el objetivo de contrastar los resultados obtenidos con los datos que entrega una simulación dinámica con el software EnergyPlus. De esta comparación surgirán elementos de juicio para poder validar, calibrar y/o modificar el modelo DETED® - tanto

<sup>1</sup> El modelo ha sido desarrollado por una empresa nacional de fabricación de paneles aislantes y soluciones constructivas (<https://grupoltn.com/friolatina/>).

en sus hipótesis simplificativas como en su estructura-, en función de minimizar las diferencias de respuesta en ambos modelos cuando ambos son perturbados con el mismo estímulo calórico.

## METODOLOGÍA

La metodología del presente consiste en 3 etapas consecutivas, la etapa 2 y 3, son de iteración dado que los resultados de una proveen los datos para la validación de la otra, y viceversa.

La primera etapa, es el desarrollo del modelo DETED, realizado por la empresa Friolatina. La etapa 2 consiste en la simulación dinámica con el programa Energy Plus para un período de 15 días de verano y 15 días de invierno. Utilizando los datos de las simulaciones como Data-set se realiza la prueba de modelo DETED confrontando los resultados de la etapa 2 con estas salidas. A partir de este estudio se observan algunas hipótesis que se deben corregir y/o modificar, retroalimentando la etapa 1 con los resultados de la 3 y así sucesivamente hasta alcanzar el ajuste deseado.

### 1- Desarrollo del modelo DETED

El modelo DETED (*Figura 1*) está desarrollado en función de comparar el comportamiento de distintos tipos de envolventes para cubierta y muro, cambiando los materiales sobre la misma geometría y dimensiones de un edificio, analizando el impacto sobre los siguientes parámetros: temperatura del aire interior, temperaturas superficiales (interior y exterior) y tasa de flujo calórico en la unidad de tiempo que atraviesa la envolvente, y también la que se almacena transitoriamente en la masa de los materiales durante las 24 horas de un día de verano y de invierno.

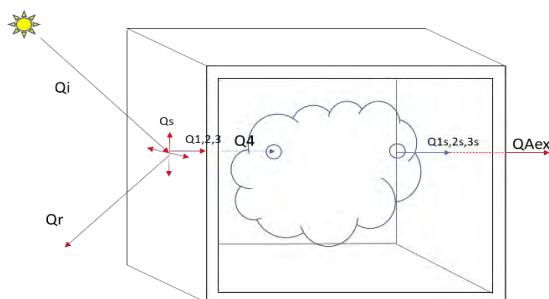


Figura 1: Modelo matemático DETED

$$(Q_i - Q_r - Q_s) - Q_t = m \cdot c_e \cdot dT / dt \quad (1)$$

$$Q_i - Q_r - Q_s = Q_t \quad (2)$$

Donde:

Ecuación 1: Primera Ley de la Termodinámica o Principio de Conservación de la energía aplicada al muro iluminado por el sol.

Ecuación 2: Es igual a la ecuación 1 en situación de estado estacionario.

( $Q_i - Q_r - Q_s$ ): Tasa de Calor neto (energía en la unidad de tiempo) que ingresa al muro soleado [w]

$Q_t = Q_{1,2,3}$ : Tasa de calor transmitido que sale por la cara interior del muro soleado después de atravesarlo en forma normal [w]

m: Masa del muro [kg]

$C_e$ : Calor específico del muro. [W.s/(kg.°C)]

$Q_i$ : Tasa de Calor incidente de la radiación solar. [w]

$Q_r$ : Tasa de Calor reflejado por el muro hacia su entorno exterior. [w]

$Q_s$ : Tasa de Calor que genera el calentamiento superficial del muro, generando la Temperatura superficial o Temperatura Sol-Aire.

$dT/dt$ : Variación de la temperatura T del muro en la unidad de tiempo. [°C/s]

$Q_4$ : Calor que ingresa a la masa de aire interior .

### Estructura del modelo DETED®

Existe una semejanza directa entre las leyes físicas y ecuaciones matemáticas que caracterizan el comportamiento del flujo del calor transmitido por conducción en los materiales y el flujo de una corriente eléctrica a través de un circuito (Pipes, 1957). Aprovechando esta semejanza es posible utilizar las analogías y la metodología comúnmente empleada en el análisis de fenómenos transitorios en circuitos eléctricos, a través de la transformada de la Laplace. Mediante esta, es posible analizar con una metodología simple, el desempeño térmico transitorio y de estado estacionario en circuitos donde lo que circula es el calor como energía en la unidad de tiempo, toda vez que aparece una diferencia de temperaturas entre dos puntos del circuito. Existe una amplia experiencia en la caracterización térmica dinámica de los materiales basada en esta semejanza (ISO 13786, 2007).

La Ley de Ohm en los circuitos eléctricos establece que la corriente eléctrica (flujo de cargas eléctricas en la unidad de tiempo) es directamente proporcional a la diferencia de tensión existente entre dos puntos del circuito y la resistencia eléctrica entre ambos puntos.

En forma análoga, la ley de Fourier (conducción del calor a través de una pared plana en estado estacionario), establece: La tasa de calor (flujo de energía calórica en la unidad de tiempo, en watts) que circula en un circuito térmico es directamente proporcional a la diferencia de temperatura entre dos puntos del circuito y la resistencia térmica entre ambos puntos.

La estructura de las ecuaciones de Ohm y de Fourier es idéntica con la corriente eléctrica I equiparable a la tasa transferencia de calor Q, la diferencia de tensión es equiparable a la diferencia de temperaturas y la resistencia

eléctrica en Ohm es equiparable a la Resistencia térmica del circuito.

De un modo similar, la ecuación de la tensión en bornes del capacitor en un circuito eléctrico es comparable con la temperatura de un sólido según la ecuación 1.

La igualdad de estructuras de las ecuaciones plantea una equivalencia directa entre el capacitor eléctrico  $C$  como un dispositivo capaz de almacenar carga eléctrica con el producto  $m.C_e$  como la capacidad del sólido para almacenar calor durante el periodo transitorio durante el cual su temperatura va cambiando en la unidad de tiempo.

A partir de estas analogías, cada capa de cada muro o cubierta del edificio puede representarse con su equivalente térmico circuital como el que se muestra en la Figura 2. Como ejemplo se toma un muro de panel aislante conformado por 3 capas como mostrado abajo

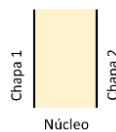


Figura 2: Esquema de muro de 3 capas.

Quedará representado por el circuito térmico de la Figura 3.

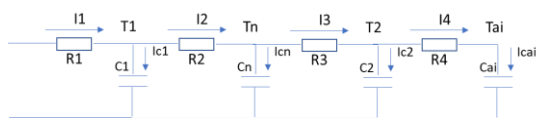


Figura 3: Circuito térmico del modelo matemático DETED.

Donde: El lado izquierdo representa la parte externa del muro que está en contacto con el aire exterior, mientras que lado derecho terminado con  $R_4$  representa la parte del muro en contacto con el aire interior del ambiente. Siendo  $R_1$  la suma de la resistencia superficial externa ( $R_{se}$ ) más la resistencia de la mitad de la capa de chapa del lado izquierdo. Mientras que  $R_4$  es la suma de la resistencia superficial interna ( $R_{si}$ ) más la resistencia de la mitad de la capa de chapa del lado derecho.

Esta red circuital que representa térmicamente a un muro tendrá asociada una impedancia térmica dado que estará sometido a una perturbación térmica alternada y cíclica en el tiempo con un periodo de 24 horas. La misma, a diferencia de la resistencia térmica, es la que caracterizará su comportamiento dinámico frente a este estímulo térmico quasisinoidal. Este se manifiesta tanto por la temperatura ambiental exterior del aire como la variación de radiación solar diaria y estacional. La presencia de estos capacitores térmicos son los que determinan la inercia térmica del circuito en términos de desfase entre las temperaturas y los flujos calóricos. Lo mismo ocurre con el adelanto de fase de la corriente capacitiva en un circuito eléctrico RC de corriente alterna con respecto a la

tensión en bornes del capacitor. Es lo que da origen a la potencia reactiva eléctrica. Aquella que es necesaria para generar el campo eléctrico en los elementos capacitivos (o el campo magnético en los componentes inductivos)

Esta red circuital sometida a una temperatura variable en el tiempo puede resolverse mediante las leyes de kirchoff para las corrientes (flujos calóricos) y la ley de faraday para las variaciones de tensión (de temperatura) en distintas partes del circuito. El modelo se resuelve en un sistema de varias ecuaciones diferenciales de primer orden (tantas como capas RC haya en cada mampuesto). Las mismas se resuelven en forma simultánea mediante técnicas de integración numérica (integradores digitales) y también con la ayuda del algebra de bloques que proporciona la transformada de Laplace. De esta forma el modelo matemático del edificio se configura con una arquitectura circuital simple capaz de determinar la temperatura y el flujo calórico en cualquier parte del circuito. Esta estructura del modelo matemático, tipo función de transferencia, permite además la posibilidad de una comprensión conceptual inmediata (además de la cuantificación numérica) de cada paso del fenómeno de transmisión de calor.

Esta estructura circuital es llevada a un modelo computacional mediante el algebra de bloques que ofrece la transformada de Laplace. La misma, en formato de funciones de transferencia conduce a un bloque básico computacional del programa DETED®. Con esta metodología se muestra en la Figura 4, como ejemplo, la representación circuital y computacional de un muro monocapa expuesto a la luz solar en una de sus caras.

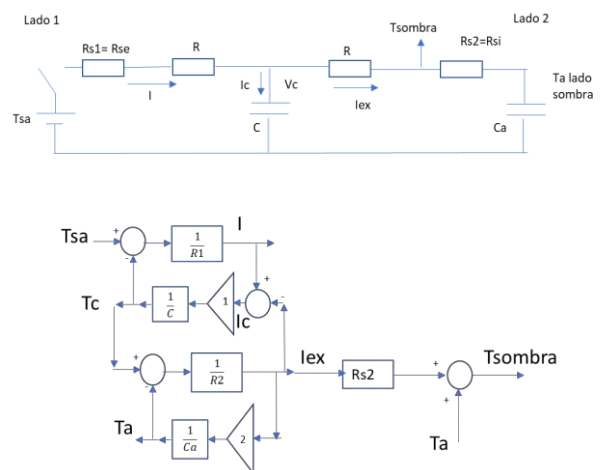


Figura 4: Circuito térmico del modelo matemático DETED.

Finalmente, el circuito térmico que representa a un edificio simple, sin aberturas es como el mostrado en la Figura 5.

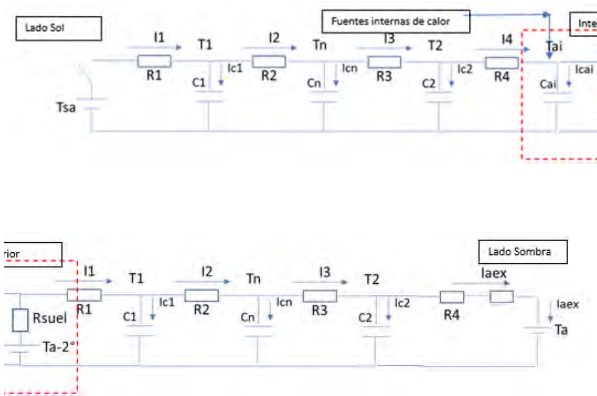


Figura 5: Circuito térmico del modelo matemático DETED.

Donde:

Tsa es la temperatura sol aire.

Tai es la temperatura interior del aire del recinto.

Ta es la temperatura ambiente exterior.

Se asumen diferentes hipótesis para el cálculo que realiza el DETED:

- A) El calentamiento considerado en cada elemento del edificio y en el propio sistema edificio, es un proceso no adiabático. Es decir que recibe energía calórica en la unidad de tiempo, se calienta y la transmite a su entorno.
- B) Cada elemento del edificio se considera como un parámetro concentrado en el espacio y su temperatura en el modelo está localizada en el punto medio de su espesor.
- C) Se considera solo la transmisión del calor en forma normal a las superficies constructivas.

## 2- Simulación en software Energy Plus

Como caso de estudio se utiliza un edificio base de 3 m x 3 m x 2,4 m (largo, ancho y alto). El trabajo de simulación se enfoca en el desempeño térmico y energético de la envolvente de diferente materialidad de muros y techos que lo cierran completamente. La superficie del piso es la misma para todos los escenarios de estudio, conformado por un contrapiso de 15cm de hormigón. El edificio se encuentra aislado de otros edificios por lo que no posee obstrucciones a la radiación solar. Se encuentra emplazado en la provincia de Mendoza, en el departamento de Guaymallén, para lo que se utiliza un archivo climático EPW con datos observados de los años 2003 a 2017, obtenido de la página Climate.OneBuilding.Org.

Se realizaron simulaciones dinámicas para los dos periodos mencionados anteriormente en diferentes escenarios. Estos escenarios se enfocan en probar la respuesta de diversas materialidades. Se trabaja entonces con dos grupos de cerramientos, uno donde gobierna un núcleo de material aislante y, otro donde gobierna el material con masa térmica. La materialidad de la

envolvente resulta entonces un factor clave para determinar el desempeño de cada escenario.

A continuación, se describen los elementos de la envolvente y su materialidad. En la Tabla 1 se presentan los valores de resistencia y de conductividad térmica calculados para cada elemento:

- Envolvente 1: chapa + núcleo + chapa
- Envolvente 2: chapa + lana de vidrio + chapa
- Envolvente 3: teja + lana de vidrio + machimbre
- Envolvente 4: revoque + ladrillo + revoque
- Envolvente 1-b: chapa + núcleo + chapa

Tabla 1: Valores de conductancias de los elementos arquitectónicos

Envolvente	Resistencia térmica [m <sup>2</sup> .K/W]	Conductancia térmica [W/m <sup>2</sup> .K]
1	2.54	0.39
2	1.77	0.56
3	1.87	0.54
4	0.49	2.06
1-b	3.35	0.30

Las cinco envolventes expuestas se combinan entre sí, de esto se desprenden seis escenarios de estudio que se presentan en la Tabla 2. En las simulaciones de los escenarios se solicitó como datos de salida las temperaturas superficiales interiores, las temperaturas superficiales exteriores, la temperatura del aire y el flujo energético que atravesaba cada elemento de la envolvente.

Tabla 2: Descripción de escenarios analizados

Escenario	Cubierta	Muros
E1	Envolvente 1	Envolvente 1
E2	Envolvente 4	Envolvente 4
E3	Envolvente 3	Envolvente 4
E4	Envolvente 2	Envolvente 4
E5	Envolvente 1	Envolvente 4
E6	Envolvente 1	Envolvente 1-b

De los escenarios 1 y 2 (E1 y E2 respectivamente), se ampliaron las simulaciones para realizar un análisis de sensibilidad y evaluar la incidencia de diversas variables siendo: la absorptividad de las superficies exteriores, el espesor del núcleo aislante, la existencia de infiltraciones por rejillas, la existencia o no de ventanas y diferentes materialidades y, por último, la combinación de infiltraciones y la ventana. Las variables analizadas y los rangos se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3: Variables y valores de rangos utilizados

Variable	Rango
Espesor núcleo (esc. 1)	0.1 m - 0.15 m - 0.2 m
Espesor muro (esc. 2)	0.1 m - 0.4 m
Absortividad (a)	0.4 - 0.6 - 0.8 - 1
Rejillas	a: 20cm x 20cm - b: 40cm x 40cm
Ventana de 1 m <sup>2</sup>	Simple vidrio (SV) - Doble vidrioado hermético (DVH)

### Confrontación del Data-set de Energy con los resultados de DETED

En una primera instancia se realizó la confrontación de los resultados para el día 3 de enero (estación de verano). Esto se realizó utilizando los valores de temperatura ambiente exterior, temperaturas superficiales exteriores y temperaturas del piso obtenidas del modelo Energyplus, como entradas de perturbación en el modelo DETED. De esta forma se asegura que ambos modelos están siendo perturbados de manera idéntica.

En una segunda instancia se procedió a comparar las respuestas de ambos modelos en los E1 y E2.

### RESULTADOS

En el modelo Energyplus, es posible analizar el comportamiento de cada modelo. Analizando los E1 y E2, las diferencias observadas evidencian la incidencia de la materialidad en el comportamiento térmico, tanto del espacio interior como de las superficies. El escenario 1 muestra mayor disonancia cuando cambian los valores de las variables en las temperaturas superficial interiores y exteriores. Esto se advierte como consecuencia de la situación conservativa del E1 frente al E2.

El E2 presenta valores mayores en el flujo de calor, lo que se corrobora con situaciones similares en la sensibilidad a los cambios en las superficies interiores y exteriores de todos los parámetros.

En la Tabla 4, se presenta una jerarquización de incidencia (de mayor a menor) de cada variable en el cambio de desempeño térmico.

Tabla 4: Ponderación de variables desde más incidente a menos incidente en el cambio de rangos.

Estación	E1	E2
Verano	1.Infiltración 2.Ventanas 3.Espesor de núcleo 4.Abosrotividad	1.Espesor de muro 2.Absortividad 3.Infiltración 4.Ventanas
Invierno	1.Infiltración 2.Espesor de núcleo 3.Ventanas 4.Abosritividad	1.Infiltración 2.Espesor de muro 3.Absortividad 4.Ventanas

En cuanto a la oposición de los resultados de la simulación frente al modelo DETED, ambos modelos fueron perturbados con las mismas condiciones climáticas del día tipo seleccionado y se analizó la respuesta en términos de temperaturas superficiales y temperatura del aire interior. El análisis comparativo exhaustivo se encuentra en proceso. Sin embargo, las primeras comparaciones entre los resultados de ambos modelos en los escenarios 1 y 2

permiten establecer el grado de acercamiento del modelo actual DETED® con respecto al de EnergyPlus. En la Figura 6 y 7, se muestran las temperaturas de aire interior obtenidas con EnergyPlus y con DETED en el escenario 1 y 2 respectivamente, junto a la referencia de temperatura de aire exterior.

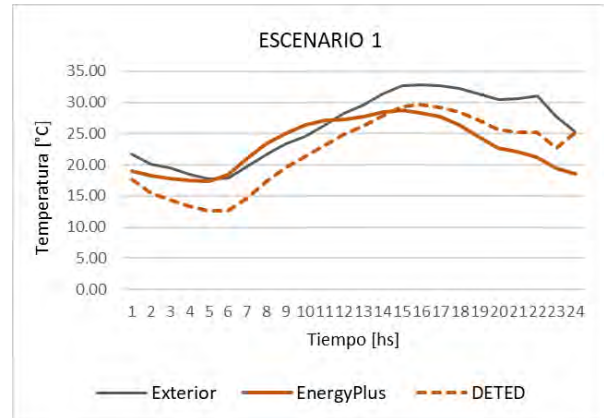


Figura 6: Comparación de temperaturas del E1

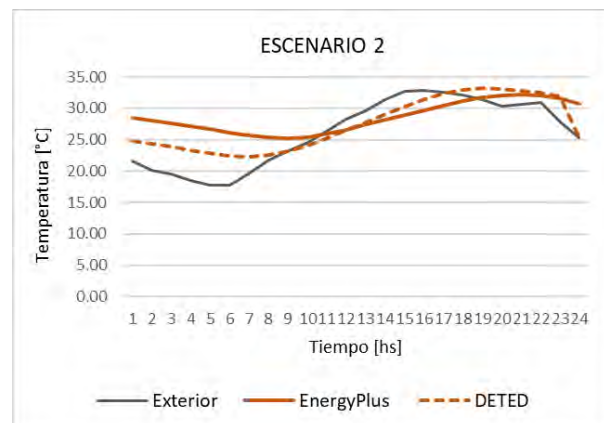


Figura 7: Comparación de temperaturas del E2

Observando la evolución de la temperatura interior del aire del recinto, se observa que ambos modelos muestran curvas de formas muy similares entre sí y valores muy cercanos en los máximos. Los mínimos presentan algunas diferencias y estas se acentúan hacia las primeras horas del día.

El caso del E1, un modelo principalmente liviano desde su densidad y conservativo térmicamente, se muestra en el modelo DETED con mayor variación térmica entre Tmin y Tmax, evidenciando la falta de material másico para la acumulación. Si bien se trata de un modelo altamente conservativo, la atenuación de la amplitud térmica no es alcanzada. En el modelo mencionado, el piso no posee un elemento *capacitor* que pueda representar la situación de lo que implica el único elemento másico en el recinto. Por otro lado, el modelo Energy plus, posee una estructura sólida en la representación de las transferencias y acumulación de calor que se producen a través del piso. En el caso del E2, la masa está presente en la envolvente vertical donde el

círculo térmico del DETED si presenta capacitores que actúan como acumuladores de energía, lo que hace visible el acercamiento en el comportamiento de la temperatura del aire interior de los dos modelos.

En la Tabla 5 se presentan los valores de Temperatura máxima y mínima y las diferencias observadas entre ambos modelos. La mayor disparidad es observada en el E1, esto se considera también, consecuencia de la falta de representación del único elemento másico que posee el modelo. Cuando no existe un elemento donde se pueda acumular la energía, esa misma va al aire, lo que ocasiona que eleve su temperatura. En el caso del E2, si bien existe un delta entre los resultados, se observa que es menor en un 36% que su anterior.

Tabla 5: Confrontación de resultados de Energy Plus y DETED para el día 3 de enero.

Día 3 de enero	Temp. Máx. [°C]	Hora	Temp. Mín. [°C]	Hora	$\Delta T$ (E+ vs. DETED)		
					Máx	Mín	
E1	E+	28.8	15	17.3	5	0.9	4.7
	DETED	29.6	16	12.6	5		
E2	E+	32.2	21	25.3	9	1.0	3
	DETED	33.2	19	22.3	7		

Este análisis, permite advertir la importancia de los capacitores en el circuito térmico que permiten representar la masa térmica, estrategia de diseño bioclimático fundamental para las características climáticas de la ciudad de Mendoza.

Las diferencias halladas hasta ahora han permitido identificar puntos de mejora en las hipótesis simplificadoras del programa DETED:

- En la hipótesis inicial A, donde se consideró una tasa de flujo muy modesta a través del suelo. Esta debe ser corregida y aumentada para nivelar resultados entre ambos modelos.
- En la hipótesis inicial B se considera (durante las horas solares) un porcentaje fijo, promedio, de superficie soleada y un porcentaje fijo, promedio, de superficie sombreada. Sin discriminar caras, según sus puntos cardinales. Esta hipótesis debe ser rectificadas considerando cada cara, según su punto cardinal individual.
- Las mejoras a realizar según a) y b) implican cambios de estructura importante en la

arquitectura del modelo. Sin embargo, por su característica modular, son simples de realizar, para luego continuar con la comparativa, en todos los escenarios planteados y en los análisis de sensibilidad.

## CONCLUSIONES

La comparación de los modelos ha permitido observar rápidamente las diferencias generales y puntuales e identificar sus posibles causas. El contraste entre escenarios de un mismo modelo ha mostrado resultados muy convergentes con diferencias numéricas en el orden del 4,7% entre ambos modelos. Además, la importancia de la incorporación de la inercia térmica en los circuitos térmico y su traslación a lo modelados matemáticos.

De estos primeros resultados se infieren trabajos a futuro muy alentadores en función de la gran cantidad de datos obtenidos. Se asume también, que el modelo desarrollado presenta importantes potencialidades. Esto, hace posible la optimización del modelo DETED de un modo sistemático en un plazo muy corto, por lo cual se prevé continuar profundizando el análisis con secuencias de simulación más extensas y/o anuales. Además se ha comenzado a trabajar con el Método de ensayo para evaluar programas de simulación de rendimiento de edificios (ASHRAE 140).

## REFERENCIAS

- Magni, M., Ochs, F., Streicher, W. (2022). Comprehensive analysis of the influence of different building modelling approaches on the results and computational time using a cross-compared model as a reference, *Energy and Buildings* 259, 1-34.
- Pang, Z., O'Neill, Z., Li, Y., Niu, F. (2020). The role of sensitivity analysis in the building performance analysis: a critical review. *Energy & Building*, 209, 109659.
- Pipes, L. A. (1957). Matrix Analysis of Heat Transfer Problems, Journal, Franklin Institute, Vol. 263, No. 3
- Standard EN ISO 13786 – 2007 Thermal performance of building components – Dynamic thermal characteristics – Calculation Methods
- W. Tian (2013). A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20 . 411-41.



# Análise da relação entre o consumo energético e os vidros laminados, insulados duplos e triplos no Brasil

Paulyne Vaz Rocha<sup>1</sup>, Martin Ordenes Mizgier<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LabCon, UFSC, Florianópolis, Brasil, paulynevazrocha@hotmail.com

<sup>2</sup>LabCon, UFSC, Florianópolis, Brasil, martin.ordenes@ufsc.br

## Resumo

Os vidros insulados são utilizados nos países que possuem grandes amplitudes térmicas com invernos rigorosos. No Brasil, os vidros insulados tiveram melhores resultados em cidades que apresentaram pequena amplitude térmica, com temperaturas altas e constantes. Notando a falta de comparação entre diferentes tipologias e vidros, a pesquisa analisou a relação entre o consumo energético de ar condicionado de uma edificação e o uso de vidros laminados, insulados duplos e triplos, através de simulação computacional no EnergyPlus. Os resultados mostraram que o vidro SKN insulado triplo obteve menor consumo energético em ar condicionado em todas as cidades. Porém, as melhores porcentagens de economia de energia ocorreram quando houve troca do vidro laminado simples para o insulado duplo.

## Introdução

O consumo energético no Brasil está crescendo ao longo dos anos. Segundo o Atlas da Eficiência energética, EPE (2021), as edificações consomem 51% da eletricidade do país e por este motivo tem maior potencial em relação a eficiência energética. O setor que mais consome é o industrial com 36%, seguido do residencial com 30% e o comercial com 19%. Em 2020, com a pandemia do coronavírus (COVID-19), o setor comercial foi um dos mais afetados, seu consumo caiu 7,7% em relação a mesma época no ano anterior. Segundo Pinto e Westphal (2019) *apud* Li; Lam (2000); Carvalho, Rovere, Gonçalves (2010); Besen, Westphal (2014), alguns estudos apontam que no setor comercial o uso do ar condicionado pode representar entre 35 e 70% do consumo total de energia elétrica.

A envoltória e os componentes construtivos são fatores essenciais para o desempenho energético e conforto ambiental das edificações. Segundo Kamimura (2018) *apud* Gustavsen *et al.* (2011), as janelas representam entre 30 a 50% dos ganhos e perdas de calor do ambiente com o exterior.

Os vidros insulados são compostos por lâminas de vidros (duas ou três) com espaçamento entre elas, as chamadas câmaras de ar. De acordo com Huang, Niu e Chung (2014), a principal finalidade deste modelo é o isolamento térmico proporcionado pela câmara de ar, atuando como

um bloqueio entre o fluxo exterior-interior, dificultando a entrada de calor externo e também fluxo interior-exterior, dificultando a dispersão das cargas internas.

Um dos fatores mais relevantes para a definição da temperatura local é a latitude, definindo assim, a duração do dia e ângulo solar. Conforme Christopherson (2012), podemos afirmar que locais mais próximos do Equador (0°) serão quentes, passando por zonas intermediárias com temperaturas e latitudes variáveis, chegando aos polos (90°) onde será constantemente frio.

## Objetivo

O objetivo deste artigo é a análise de vidros com Fator Solar 34 (SKN) e 43 (KNT), sendo laminados simples, insulados duplos e triplos em diferentes climas e cidades brasileiras de latitudes menores que 20° e a relação do consumo energético em ar condicionado através de simulação computacional pelo EnergyPlus.

## Metodologia

### Seleção de cidades

Segundo Pinto e Westphal (2019), cidades com latitudes abaixo de 20° (linha tracejada na Figura 01) obtiveram melhores resultados quando vidros insulados duplos foram utilizados. A partir desta conclusão, foram escolhidas 5 cidades com diferentes latitudes e climas, com exceção de Salvador e Recife que possuem o mesmo clima, como mostrado na Tabela 01 e Figura 01.

Tabela 01 – Dados sobre as cidades

Cidades	Latitude	Clima	Zona Bioclimática	Temperatura Média Anual
Cuiabá	15°35'56" S	Tropical Brasil Central	7	26,5°C
Salvador	12°58'16" S	Tropical Nordeste Oriental	8	25,6°C
Recife	8°04'03" S	Tropical Nordeste Oriental	8	26,0°C
Manaus	3°6'26" S	Equatorial	8	27,4°C
Boa Vista	2°49'10" N	Tropical Zona Equatorial	8	28,2°C

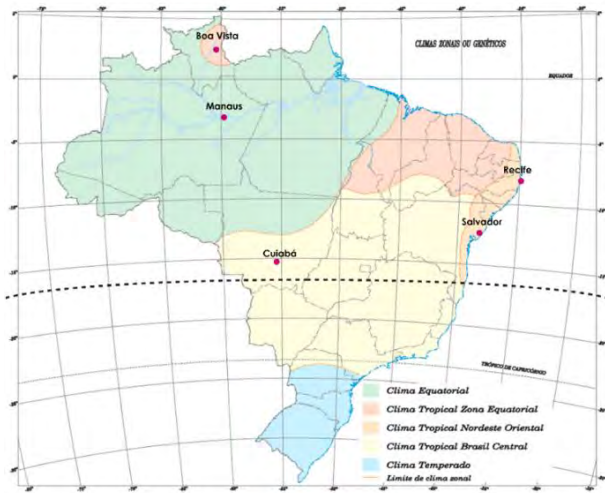


Figura 01 – Mapa de clima do Brasil

**Modelo Geométrico**

O modelo da edificação analisada foi inspirado no modelo de Pinto e Westphal (2019), uma planta aberta de um edifício de escritórios hipotético com WWR (Window-to-Wall-Ratio) de 60%. O modelo foi dividido em 5 zonas: 4 externas condicionadas e 1 central acondicionada. As Zonas Externas têm distância de 10,50m entre as fachadas e a Zona Central e cada uma tem área de 257,25m<sup>2</sup>. A Zona Central tem dimensões de 14x14m e tem área de 196,00m<sup>2</sup>, conforme Figura 02. E a área total do pavimento é 1.225m<sup>2</sup>. O modelo foi testado com 10 pavimentos de 3,00m de laje a laje, com um total de 30m de altura total.

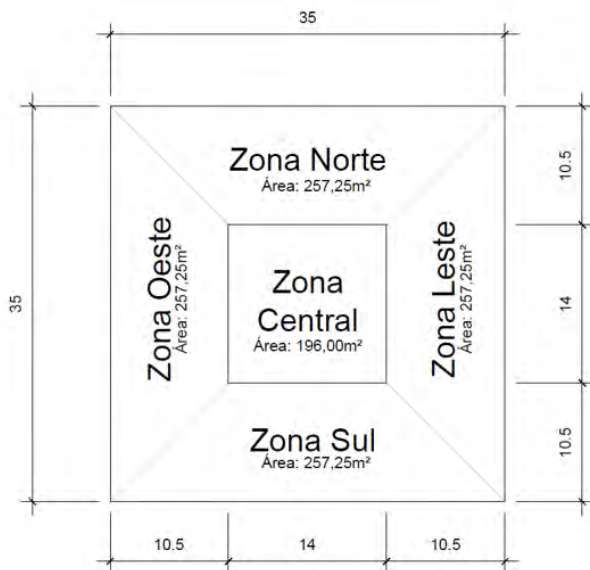


Figura 02 – Planta Baixa esquemática do Pavimento Tipo e as Zonas

**Cargas Internas**

As cargas internas de iluminação, ocupação e equipamentos deste edifício foram definidas de acordo

com a NBR 16.401-1, ABNT (2008), onde cada uma delas está disposta na Tabela 02.

Tabela 02 – Cargas Internas por pavimento Tipo

	Ocupação (m <sup>2</sup> /pessoa)	Iluminação (W/m <sup>2</sup> )	Equipamentos AC (W/m <sup>2</sup> )
Zonas Externas	8	10,5	16
Zona Interna	25	8	0

A ocupação do edifício é das 8 as 18h nos dias de semana e fica reduzida durante o horário do almoço entre 12 e 13h. O ar condicionado é composto por dutos de splits padrões de COP 3,2W/W.

**Materialidade**

Os elementos estão definidos conforme Tabela 03, onde estão dispostos a composição de cada elemento construtivo, a transmitância térmica e a capacidade térmica. Os valores de transmitância térmica e capacidade térmica foram obtidos a partir da ferramenta “Calculadora de propriedades” no site da Projeteec, na aba 3 “Componentes Construtivos” e o valor de absorptância foi definido conforme Tabela B.2 da NBR 15.220-2, ABNT (2005).

Tabela 03 – Elementos Construtivos

	Composição	Transmitância Térmica (W/m <sup>2</sup> K)	Capacidade Térmica (kJ/m <sup>2</sup> K)	Absortância (α)
<b>Paredes Externas</b>	Argamassa (2,5cm) + Bloco Cerâmico 2 furos (14cm) + Câmara de ar (2<e<5) + Bloco Cerâmico 2 furos (14cm) + Argamassa (2,5cm)	1,1	224,6	0,3 a 0,5
<b>Paredes Internas</b>	Placa de Gesso (12,5cm) + Lã de rocha (5cm) + Placa de Gesso (12,5cm)	0,5	199,5	0,2
<b>Laje + Piso</b>	+ Contrapiso (1cm) + Concreto maciço (20cm)	3,0	500,00	0,65 a 0,8

**Vidros**

Após uma pesquisa nas principais empresas de vidros (Cebrace, Guardian e AGC) optou-se por 2 vidros da Cebrace, onde o Fator Solar (FS) foi o ponto determinante da escolha. O SKN Incolor com FS 34 e o KNT Incolor com FS 43. Na Tabela 04, podemos ver a composição de cada um deles, tal como sua espessura, composição, fator solar e transmissão luminosa.

Os vidros foram divididos em 3 tipos: o vidro laminado simples (vidro de 8mm), vidro duplo (vidro laminado 8mm, câmara de ar de 12mm e vidro monolítico de 6mm) e o vidro triplo (vidro laminado de 8mm, câmara de ar de 12mm, vidro monolítico de 6mm, câmara de ar de 12mm e vidro monolítico de 6mm). Podemos observar na Figura 03 como ocorre a redução do Fator Solar em função das tipologias dos vidros.

Tabela 04 – Propriedades Ópticas e Térmicas dos Vidros

SKN Incolor				
	Espessura	Composição	FS	TL
Laminado	8mm	Laminado	0,36	0,51
Duplo	26mm	Lam. + Câm. Ar + Mono.	0,28	0,46
Tripla	44mm	Lam. + Câm. Ar + Mono. + Câm. Ar + Mono.	0,24	0,42
KNT Incolor				
	Espessura	Composição	FS	TL
Laminado	8mm	Laminado	0,46	0,48
Duplo	26mm	Lam. + Câm. Ar + Mono.	0,36	0,43
Tripla	44mm	Lam. + Câm. Ar + Mono. + Câm. Ar + Mono.	0,31	0,39

TL = Transmissão Luminosa FS = Fator Solar

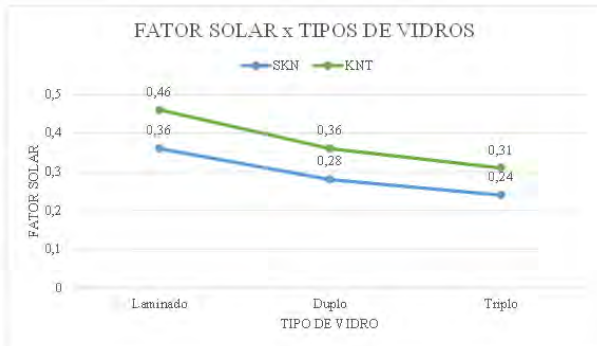


Figura 03 - Gráfico da relação entre o Fator Solar e os tipos de vidros

### Simulação

A simulação de cada vidro em suas 3 tipologias (laminado simples, insulado duplo e triplo) foi executada através da Planilha Macro no EnergyPlus (Figura 04). Esta tabela foi disponibilizada na disciplina de Inovações Tecnológicas nos Sistemas de Vedações Verticais, no Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo (PósArq) da

Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) pelo Professor Doutor Fernando Simon Westphal.

### Análise de dados

Primeiramente, foram analisados ambos os vidros e suas 3 tipologias (laminado, insulado duplo e triplo) em cada cidade de acordo com o consumo anual de energia elétrica em ar condicionado (aquecimento, resfriamento e ventilação), logo gerou-se 30 combinações de simulação. E por fim, uma análise geral de todos os vidros e tipologias para levar a conclusão de qual vidro tem melhor desempenho em relação ao menor consumo de energia elétrica em ar condicionado.

### Resultados

A relação entre consumo energético de ar condicionado e os vidros em cada cidade analisada resultou na Figura 05. Podemos observar que a cidade de Boa Vista teve maior consumo, ou seja, a cidade com latitude mais próxima da Linha do Equador. Seguindo esta lógica, a cidade que deveria ter menor consumo seria Cuiabá, que é a cidade com maior latitude, mas quem ocupou esta posição foi Salvador. Nota-se também que Recife e Cuiabá têm consumos energéticos bem semelhantes, portanto não podemos afirmar que à medida que a latitude diminui o consumo aumenta.

A partir das Figuras 06 a 10, podemos observar que há uma redução no consumo de energia quando o vidro laminado simples é trocado pelo insulado duplo. E a troca do insulado duplo para o insulado triplo, ocorre, mas de maneira menos significativa.

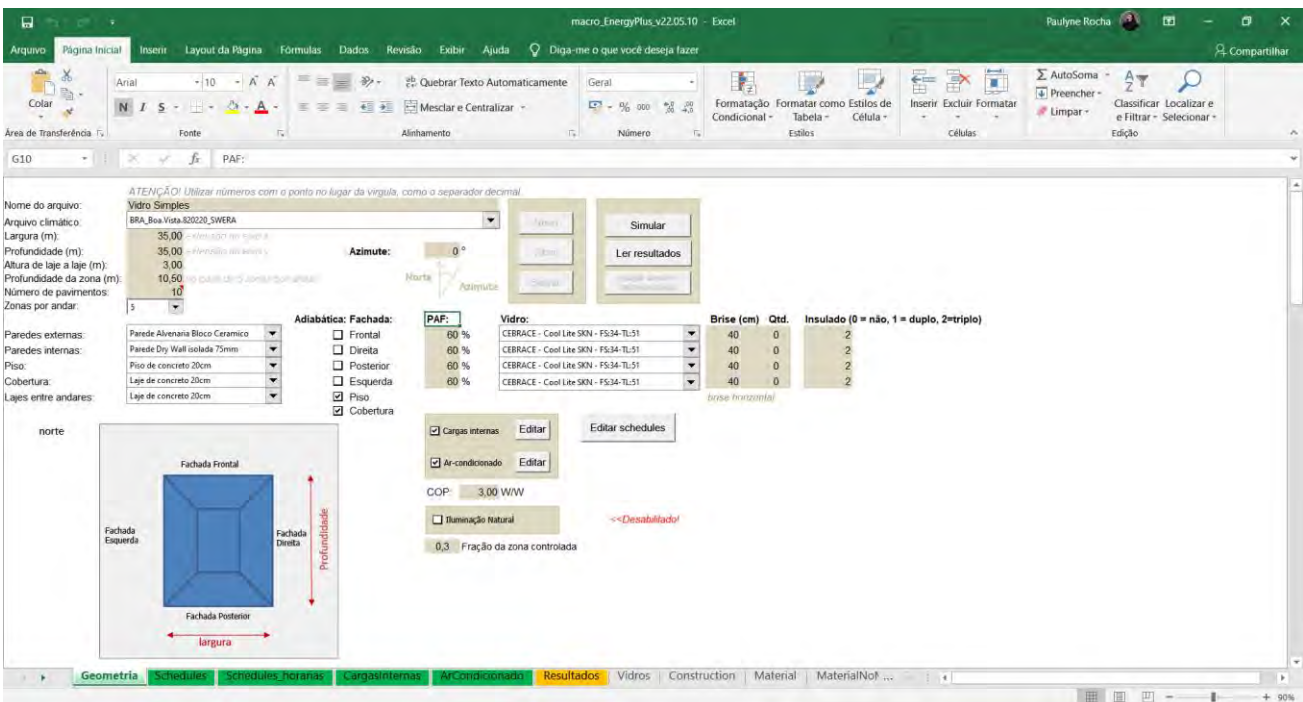


Figura 04 - Interface Inicial da Planilha Macro no EnergyPlus

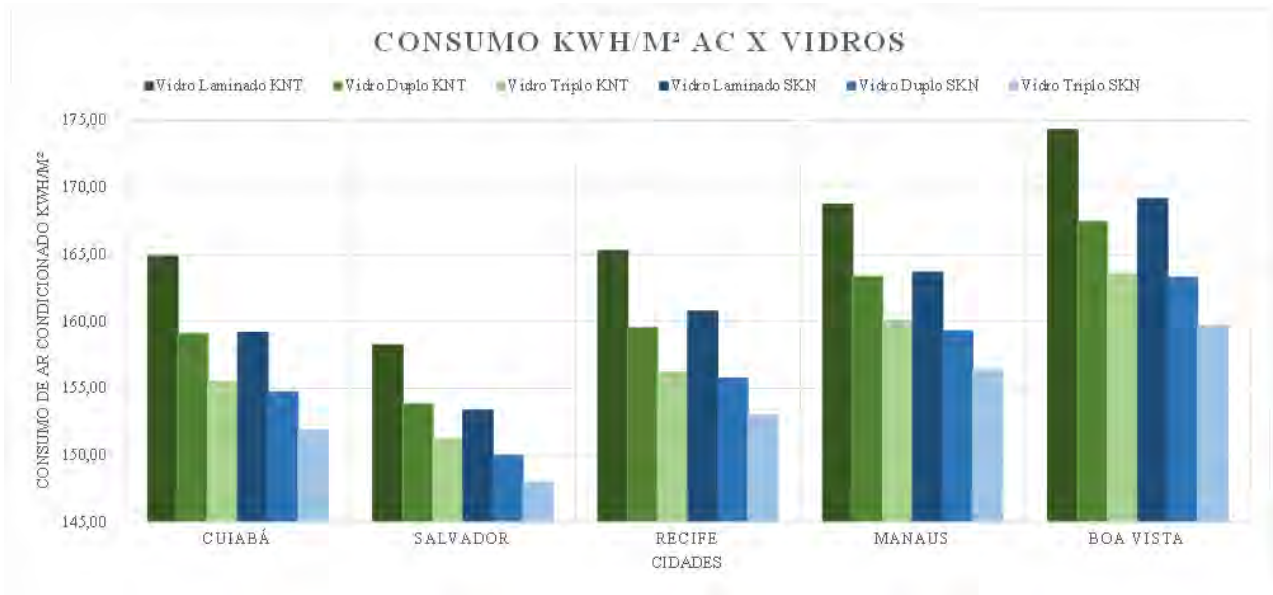


Figura 05 - Gráfico comparativo entre consumo energético e vidros

Sobre a comparação entre os 2 vidros (SKN e KNT), o KNT tem maior consumo energético em todos os cenários, porém quando o laminado simples é trocado pelo insulado duplo, ocorrem as maiores porcentagens de economia sendo a maior delas nas cidades de Cuiabá e Boa Vista com 7%, relembrando que estas cidades são os extremos em latitudes com 15°35'56" S e 2° 49' 10" N,

respectivamente. O vidro SKN tem menor consumo energético, porém as porcentagens de economia são bem mais baixas, não ultrapassando 3% de laminados simples para insulados duplos e em todas as situações há diminuição de somente 1 ponto percentual para os insulados triplos.

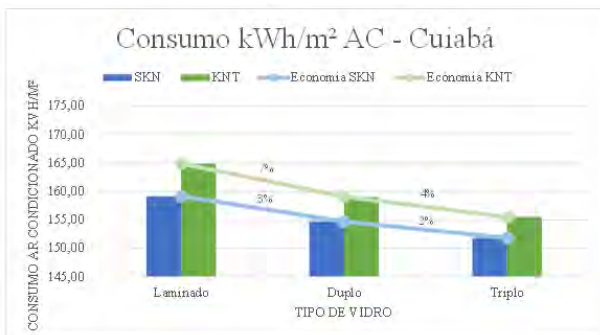


Figura 06 - Gráfico de consumo energético e vidros em Cuiabá

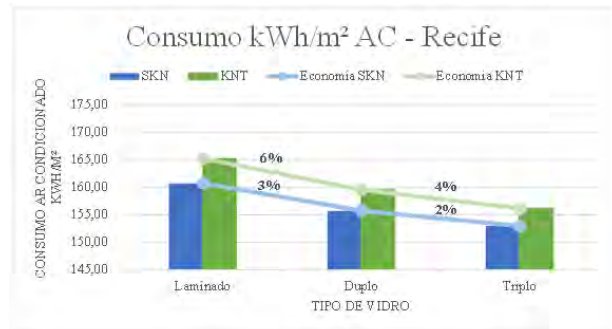


Figura 08 - Gráfico de consumo energético e vidros em Recife

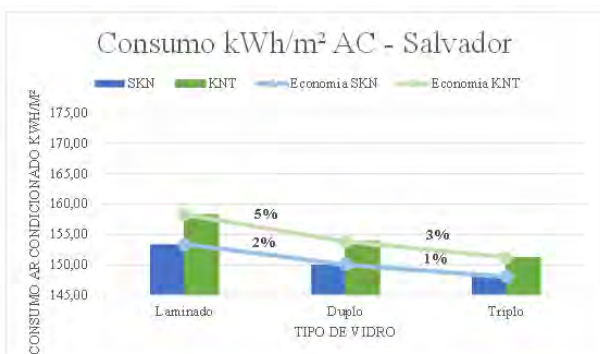


Figura 07 - Gráfico de consumo energético e vidros em Salvador

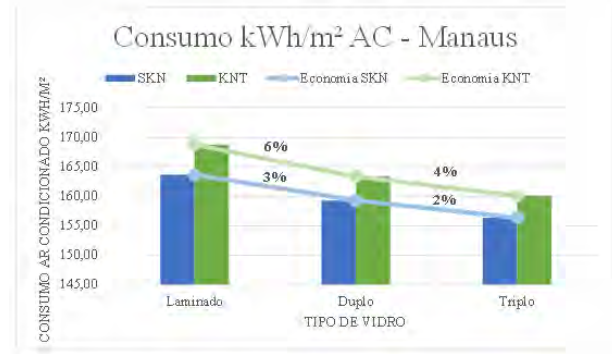


Figura 09 - Gráfico de consumo energético e vidros em Manaus

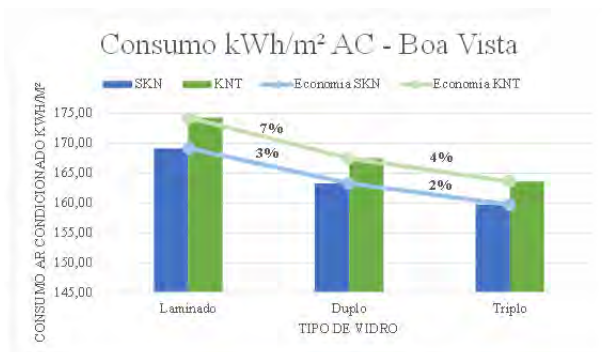


Figura 10 - Gráfico de consumo energético e vidros em Manaus

## Conclusão

O presente trabalho analisou o consumo energético em ar condicionado de um edifício de 10 pavimentos comparando o uso de vidros laminados simples, insulados duplos e triplos, através de simulação computacional no EnergyPlus, avaliando 5 cidades brasileiras (Cuiabá, Salvador, Recife, Manaus e Boa Vista) com latitudes e climas diferentes. Na escolha dos vidros, optou-se pela diferença entre o Fator Solar para avaliar o ganho de calor através do vidro.

A partir dos resultados, conclui-se que o vidro SKN insulado triplo é o vidro com menor consumo energético em ar condicionado em todas as cidades, porém quando ele é comparado com o vidro SKN insulado duplo há pouca diferença na economia de energia, somente 2%. Apesar do vidro KNT laminado ter o maior consumo energético, ele é o que tem maior economia de energia quando trocado pelo vidro KNT insulado duplo.

Devido ao fato de Cuiabá e Recife terem consumos energéticos semelhantes, podemos afirmar que a diminuição da latitude não causa aumento do consumo energético, pois Salvador está em latitude intermediária a essas duas cidades e tem consumo energético menor que ambas.

Notou-se que esse fator de economia se deve também a propriedade isolante da câmara de ar que os vidros insulados proporcionam, nos climas analisados, com grande importância pois atua como bloqueio entre o fluxo exterior-interior, dificultando as entradas de calor externo muito recorrentes nas cidades analisadas.

## Agradecimentos

Agradecemos à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro.

## Referências

- ABNT (2008). NBR 16.401: Instalações de ar condicionado - Sistemas centrais e unitários. Parte 1: Projetos das instalações. Rio de Janeiro.
- ABNT (2005). NBR 15.220: Desempenho térmico de edificações. Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social RJ.
- Christopherson (2012). Geossistemas: Uma introdução a geografia física, 7ª edição, Bookman.
- EPE (2021). Atlas de Eficiência Energética Brasil 2021: Relatório de Indicadores. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/atlas-da-eficiencia-energetica-brasil-2021>. Acesso em: 13/05/2022
- Huang, Niu e Chung (2014). Comprehensive analysis on thermal and daylighting performance of glazing and shading designs on office building envelope in cooling-dominant climates. *Applied Energy* 134, 215-228.
- Kamimura e Motta (2018). Análise do uso de vidros simples e insulados em janelas de uma edificação condicionada artificialmente. Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído, p. 417-424.
- Pinto e Westphal (2019). Energy Performance of Offices Buildings in Brazil using Insulated Glass Units. *Proceedings from Building Simulation*.
- PROCEL (2022). Componentes construtivos. <http://www.mme.gov.br/projeteec/componentes-construtivos/>. Acesso em: 17/05/2022

## Avaliação do potencial de resfriamento passivo com materiais de mudança de fase em uma habitação social no município de São Paulo/SP, Brasil

Mariane Pinto Brandalise<sup>1</sup>, Fernando Almeida<sup>2</sup>, Martin Ordenes Migzier<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Laboratório de Conforto de Conforto Ambiental (LabCon) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, marianebrandalise@yahoo.com.br

<sup>2</sup>Laboratório de Conforto de Conforto Ambiental (LabCon) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, fernandosilvaalmeida@hotmail.com

<sup>3</sup>Laboratório de Conforto de Conforto Ambiental (LabCon) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis (USFC), Brasil, martin.ordenes@ufsc.br

### Resumo

Os Materiais de Mudança de Fase (do inglês, *Phase Change Materials* – PCMs) apresentam capacidade de armazenar ou de liberar energia térmica, pela mudança (sólido-líquido-sólido) de fase do próprio material. Este artigo tem como objetivo analisar a implantação de PCMs como método passivo de resfriamento em uma edificação de interesse social pré-fabricada naturalmente ventilada, na estação de verão, através de simulações para cidade de São Paulo (SP). Dentre os resultados observados, as combinações avaliadas o PCM 22 incorporado na cobertura e parede em simultâneo, foi a situação que obteve melhor resultado mantendo 92% das horas em conforto. Além disso, a utilização do PCM foi positiva, para diminuir a amplitude térmica do ambiente estudado.

### Introdução

A necessidade de reduzir a demanda de energia das edificações é uma preocupação global. No ano de 2020, os edifícios consumiram cerca de 40% da energia mundial. No Brasil em 2021, as edificações residências, apresentaram um consumo de 26% da energia elétrica do país. Desse modo, espera-se que tal necessidade de energia relacionada ao setor da construção civil aumente cerca de 50% em 2050, e a demanda de resfriamento de ambientes, triplique entre 2010 e 2050 (ALGHAMDI et al., 2022; BEN, 2022; SOUAYFANE; FARDOUN; BIWOLE, 2016).

Nesse sentido, ressalta-se a importância de se pesquisar sistemas de resfriamento passivos que possibilitem uma redução no consumo de energia, relacionado a climatização de edificações, garantido as condições de conforto térmico mesmo em situações de calor extremo.

Um dos métodos comprovado de resfriamento passivo em edifícios com alto potencial para reduzir o consumo e a demanda de energia é o armazenamento de energia térmica (do inglês, *Thermal Energy Storage* – TES). Entre as tecnologia TES, o armazenamento térmico latente com materiais de mudança de fase (do inglês, *Phase Change Materials* – PCMs) tem se destacado por apresentar uma

alta densidade de armazenamento térmico em condições quase isotérmicas e também devido a sua menor dificuldade de aplicação e de custo efetivo em relação aos demais sistemas (SUN et al., 2022; MOHAMED et al., 2017). Uma das vantagens desse sistema é aplicação em edifícios leves, nos quais aumenta a inércia térmica, e consequentemente reduz a demanda de sistemas de ar-condicionado ou altera o uso para horários fora de pico do mesmo (RAHIMPOUR et al., 2017).

Muitas pesquisas estão sendo realizadas sobre a aplicação de PCM na envoltória da edificação, Ramakrishan et al. (2016), realizaram um estudo para a estação de resfriamento em quatro cidades da Austrália nos resultados destaca-se que a eficiência de resfriamento otimizada ficou na faixa de 0,54 a 0,64 para todas as condições climáticas e, que a ventilação noturna influencia a eficiência do PCM, além do conforto térmico interno. Beltrán e Martínez-Gómez (2019) e Piselli et al. (2020) analisaram aplicação de PCMs em edificações por meio de simulações computacionais no *software* EnergyPlus. O primeiro estudo investigou a aplicação de PCMs em paredes e coberturas de uma habitação de interesse social. Já Piselli et al. (2020) estudou a influência do controle de ventilação natural e o ponto de fusão do PCM integrado ao envelope do edifício.

Considerando as pesquisas apresentadas, salienta-se a importância de investigar aplicação PCMs em edificações a fim de se melhorar o desempenho térmico das edificações e consequentemente o conforto térmico dos usuários. Sendo assim, o objetivo desse artigo é investigar a implantação de PCMs como método passivo de resfriamento em uma edificação de interesse social pré-fabricada leve e naturalmente ventilada, na estação de verão para a cidade de São Paulo, Brasil.

### MATERIAIS E MÉTODO

O método utilizado no presente trabalho foi dividido em seis etapas: (1) condições climáticas da cidade analisada; (2) as propriedades térmicas dos materiais da mudança de fase; (3) caracterização da edificação; (4) dados de entradas utilizados na simulação; (5) parâmetros e

combinações de simulação; e, (6) critério de análise adotado para definição dos resultados.

### Caracterização climática

O desempenho de PCMs incorporados em edificações apresenta relação direta com as condições climáticas e a localização geográfica. Assim, um tipo específico de PCM têm potenciais diferentes, no qual podem economizar energia para resfriamento ou aquecimento em uma determinada zona e em outra diminuir o desempenho térmico da edificação (MARIN et al., 2016). Dessa forma, considerou-se que o município analisado deveria evidenciar frequência de ocorrência em horas das temperaturas externas da estação de verão, de acordo com as temperaturas de mudança de fase dos PCMs a serem determinados.

A cidade de São Paulo encontra-se na zona Cwa (clima subtropical) segundo Köppen-Geiger. Apresenta como característica um verão quente e chuvoso e inverno seco e ameno.

### Seleção dos materiais de mudança de fase

Para determinação dos PCMs implantados em edifícios, é importante observar o calor latente da mudança de fase, que, por sua vez, controla as temperaturas em uma faixa específica. Tal temperatura de mudança de fase deve estar próxima da temperatura ambiente desejada, para melhorar as condições do clima interno e, assim, torná-lo mais estável e confortável aos usuários (BAETENS; JELLE; GUSTAVSEN, 2010). Para este trabalho, foram selecionados dois PCMs orgânicos, sendo estes BioPCMs comerciais com temperaturas de fusão diferentes: 22°C (PCM 22) e 25°C (PCM 25). O PCM 22, a faixa de temperatura de mudança de fase varia de 20°C até 22°C, já o PCM 25 a mudança de fase ocorre entre 22°C e 26°C.

Os PCMs foram aplicados nas paredes externas, entre a lâ de vidro e a parede de gesso, e na cobertura entre a câmara de ar e o forro de gesso, de forma conjunta e individual. Na Tabela 1, são apresentadas as propriedades termofísicas destes.

Tabela 1: Propriedades termofísicas dos PCMs

Material	PCM 22	PCM 25
Temp. de fusão (°C)	22	25
Calor latente (J/kg)	190	230
Cond. Term. estado sólido (W/mk)	0.2	0.2
Cond. Térm. estado líquido (W/mk)	0.19	0.19
Densidade em estado sólido (kg/m³)	630	700
Densidade em estado líquido (kg/m³)	760	880

Tabela 2 – Propriedades termofísicas dos materiais construtivos da parede e cobertura

#	Parede			Cobertura			
	Placa cimentícia	Lã de vidro	Placa de gesso	Telha trapezoidal	Poliestireno	Telha trapezoidal	Forro de gesso
Espessura (mm)	100	0.50	125	150	3	150	125
Densidade (kg/m³)	1900	100	875	2700	35	2700	875
Condutividade (W/mk)	1.5	0.045	0.35	23	0.04	23	0.35
Calor específico (J/kgK)	850	700	840	900	1420	900	840
Transmitância (W/m²K)	0.58			0.67			
Capacidade térmica (Kj/m²K)	1.75			1.57			
Absortância (α)	0.10			0.05			

### Descrição da edificação

Uma edificação de uma habitação de interesse social térrea, do Programa Minha Casa Minha Vida (PMCV), do Brasil, foi considerada para simulação térmica deste estudo. A edificação possui formato retangular, com dimensões de 6,30 m de largura e 5,90 m de comprimento e pé direito de 3,00 m. Sua configuração espacial é constituída por dois quartos, sala, cozinha e banheiro, totalizando uma área útil de 35 m², conforme a Figura 1. Os dormitórios possuem orientação norte e a sala e a cozinha são orientadas para sul. A habitação foi modelada no programa de simulação *EnergyPlus* V.8.3 e configurada com cinco zonas térmicas e, para essa investigação, avaliou-se o dormitório 2, que possui fachadas para norte e oeste. Considerou-se para essa escolha que esse dormitório é o que apresenta maior ganhos por radiação solar no período de verão, sendo assim, seria a zona térmica na pior situação.

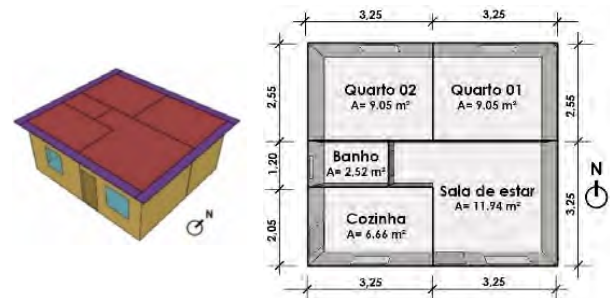


Figura 1 – 3D (a) e planta baixa da habitação (b)

A envoltória da edificação foi baseada no estudo realizado por Saffari *et al.* (2017), que é adequado para uso internacional. As seguintes características construtivas: paredes externas em placa cimentícia, lâ de vidro e placa de gesso (do exterior para o interior); parede internas em placa de gesso, lâ de vidro e placa de gesso; cobertura em telha trapezoidal 40, poliestireno, telha trapezoidal 40, câmara de ar e forro de gesso. As janelas possuem vidro simples incolor e as portas de madeira maciça.

Na Tabela 2, é possível observar as propriedades termofísicas dos materiais utilizados na envoltória da residência. Cabe salientar que o baixo valor escolhido para a absortância representa o uso de cores claras nas paredes e na cobertura, estratégia passiva indicada e aplicada para habitações de interesse social em clima quentes.

### Densidade de carga interna, padrão de ocupação e ventilação

A densidade de carga interna é definida pela soma das três principais fontes de calor: iluminação, equipamentos elétricos e ocupantes. Tais densidades foram baseadas no trabalho realizado por Ozdenefe e Dewsbury (2015), que também analisaram o desempenho térmico de uma edificação residencial e o efeito da aplicação do PCM como uma tecnologia passiva para resfriamento. Para esta pesquisa, a habitação foi modelada, considerando quatro ocupantes e foi estabelecida uma taxa metabólica de 80 watts/pessoa nos dormitórios. O sistema de iluminação foi configurado com a densidade de potência de 6 W/m<sup>2</sup>, e o sistema de equipamentos elétricos com 1.5W/m<sup>2</sup>, ambos sistemas para os dormitórios. As agendas de ocupação utilizadas nos quartos foram das 21 h da noite às 07 h da manhã em dias de semana e das 21 h às 10 h da manhã nos finais de semana.

Para as simulações, foi definido o modelo naturalmente ventilado. O cálculo das trocas de ar devido à ventilação natural foi realizado com aplicação dos objetos do grupo *Air Flow Network*. Adotado como objeto de controle a temperatura, sendo assim, as janelas só serão abertas se: (1) a temperatura da zona for maior que a temperatura do ar externo; (2) a temperatura da zona for igual ou superior ao set point de ventilação definido de 20°C; e (3) a schedule de ventilação estabelecida possibilitar ventilação no interior da edificação, conforme os horários determinados (VEIGA et al., 2019). Desse modo, para o período de simulação (verão), foram definidos dois cenários diferentes, o primeiro sem ventilação noturna (ventilação padrão), em que foi considerado ventilação entre as 21 h da noite até as 07 h da manhã, e o segundo com ventilação noturna (VN), das 18 h noite até as 07 h da manhã.

### Simulação termoenergética do modelo

Nesta pesquisa, as simulações foram realizadas no software EnergyPlus, uma ferramenta disponibilizada pelo Departamento de Energia dos EUA (DOE). Para este estudo, foi adotado o algoritmo ConDFD totalmente implícito, de primeira ordem no tempo, que permite a modelagem do fenômeno de mudança de fase, no qual o PCM é descrito por uma função de entalpia configurada pelo usuário (SHARMA; RAI, 2020), exemplificada pela Equação 1:

$$\rho C_p \frac{(T_i^{j+1} - T_i^j)}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta x} \left( -\lambda_w \frac{T_i^{j+1} - T_{i-1}^{j+1}}{\Delta x} - \lambda_e \frac{T_i^{j+1} - T_{i+1}^{j+1}}{\Delta x} \right) \quad (1)$$

Onde o  $i$  corresponde ao nó modelado e  $i+1$  aos nós adjacentes, os intervalos são representados pelo  $\Delta t$  o tempo de cálculo, e o  $\Delta x$  o espaçamento entre nós. O  $\lambda_w$  e o  $\lambda_e$  são as condutividades térmicas que constituem as interfaces entre os nós  $i$  e  $i-1$  e entre  $i$  e  $i+1$ , respectivamente.

No que tange aos nós externos das superfícies das vedações (paredes e coberturas) ( $x = x_0$ ), a Equação 2 expressa a condição de limite empregada no modelo.

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x_0} = I_\alpha - h_{out} (T_{x=x_0} - T_{out}) \quad (2)$$

Onde  $I$  representa a radiação solar incidente,  $\alpha$  a absorvância,  $T_{out}$  a temperatura de bulbo seco do ar externo e  $h_{out}$  é dado como os coeficientes de transferência de calor de radiação e de convecção.

O EnergyPlus ainda permite que a capacidade de calor específico dependente da temperatura possa ser atualizada nas diversas interações com o software, conforme a capacidade de calor efetiva. Nessa formulação, o PCM é incorporado em uma função térmica específica variável  $C_p = C_p(T, h)$  (SHARMA; RAI, 2020), representada pela Equação 3.

$$C_p = \frac{h_i^j - h_i^{j-1}}{T_i^j - T_i^{j-1}} \quad (3)$$

No qual, o  $h$  caracteriza o processo de entalpia do PCM.

No que diz respeito à geometria da edificação simulada, esta foi modelada utilizando-se da ferramenta *SketchUp* e do *plug-in OpenStudio*, e a partir das interfaces gráficas destes foram representadas as zonas térmicas da habitação. Vale salientar que, neste trabalho, foi analisado apenas o dormitório 2. As simulações foram elaboradas utilizando-se de arquivos climáticos TRY (do inglês – *Test Reference Year*).

Por fim, para analisar a influência do PCM na temperatura interna do ambiente, optou-se que em cada simulação ocorresse a mudança de um parâmetro. Na Figura 2 é possível observar as combinações simuladas, sendo elas: clima, temperatura de fusão do PCM, localização do PCM na envoltória (parede, cobertura ou parede e cobertura em conjunto) e ventilação natural padrão e noturna.

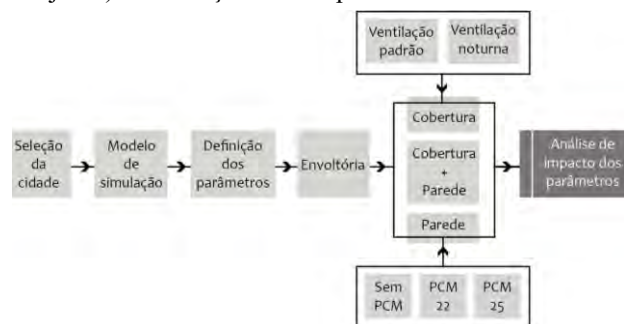


Figura 2 – Fluxograma de Simulação

### Avaliação dos resultados

Os resultados e as discussões ocorreram em três etapas. A primeira consiste na avaliação da porcentagem em horas de temperatura dentro e fora da faixa de conforto, considerando apenas a interferência dos PCMs para aumentar a inércia térmica da habitação de sistema construtivo leve e melhorar seu desempenho na estação de verão. Na segunda etapa, verificou-se a frequência de ocorrência em horas de temperatura dentro da faixa de conforto para um mês da estação de verão, porém com interesse de estudo na influência da ventilação natural noturna como uma estratégia para potencializar o processo de carga e de descarga do PCM. Tal solução foi empregada por Soudian e Berardi (2019), que também



pesquisaram PCMs incorporados às envoltórias de edificações residenciais. Por fim, na terceira etapa, um dia com as temperaturas extremas dentro do período de verão foi selecionado, com o objetivo de observar o efeito do PCM no atraso de pico da temperatura interna, assim como na amplitude térmica interna da habitação.

A determinação dos intervalos de conforto térmico foi estabelecida a partir do método de conforto adaptativo indicado pela ASHRAE (2020) para ambientes naturalmente ventilados. Esse método consiste na temperatura operativa interna admissível, que determina limites superiores (Eq. 4) e limites inferiores (Eq. 5), no qual o ocupante do ambiente está em conforto.

$$Lim. sup. de 80\% de aceit. (°C) = 0,31 t_{pma(out)} + 21,3 \quad (4)$$

$$Lim. inf. de 80\% de aceit. (°C) = 0,31 t_{pma(out)} + 14,3 \quad (5)$$

Dessa maneira, por se tratar do caráter adaptativo e por considerar as variações de temperatura existentes, foram calculadas, através das equações 4 e 5, faixas de conforto mensal na estação de verão. Sendo o limite inferior de 20,9°C e o limite superior de 29°C.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Porcentagem em horas de temperatura em conforto e desconforto

Nesta seção, a influência do PCM no conforto térmico de uma habitação de interesse social pré-fabricada localizada na cidade de São Paulo-SP foi avaliada quantitativamente

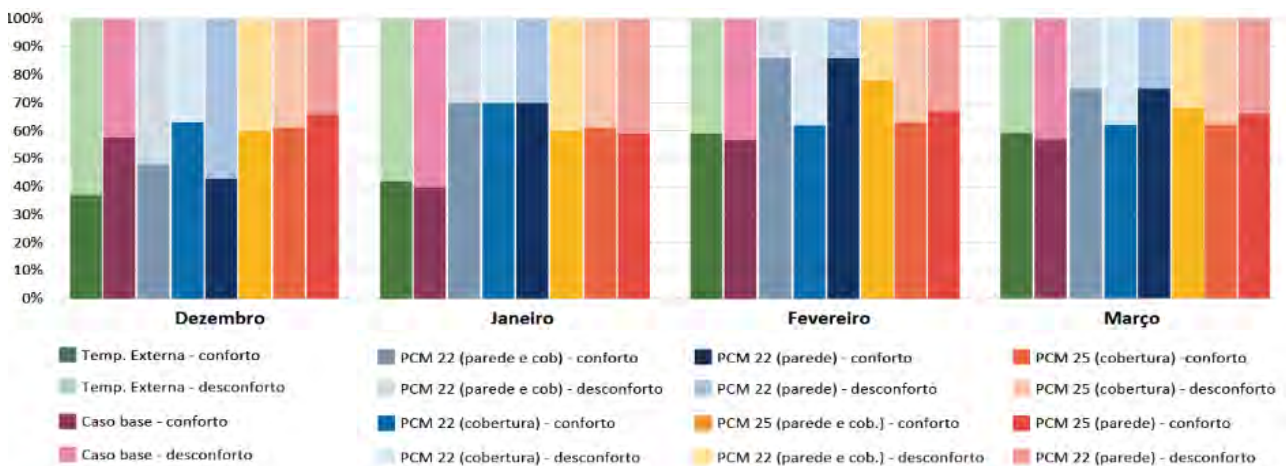


Figura 3: Porcentagem em horas de temperatura em conforto e desconforto para São Paulo

### Combinação com a ventilação natural noturna

Lei, Yang e Yang (2016), observaram em seu estudo que a incorporação de PCM em edificações resultou na elevação da temperatura interna no período noturno. Tal fenômeno pode ser explicado pelo fato deste material acumular calor durante o dia e descarregá-lo apenas à noite quando as temperaturas externas estão menores. Dessa maneira, a aplicação da ventilação natural noturna combinada com o uso do PCM é uma estratégia que pode melhorar o desempenho da edificação, contribuindo também com o processo de solidificação do PCM, e aumentando a sua eficiência nos próximos ciclos térmicos (ADILKHANOVA *et. al.*, 2021).

para a estação de verão (22 de dezembro à 20 de março, totalizando 92 dias, no hemisfério sul.), utilizando-se do conforto adaptativo para obtenção dos resultados. A porcentagem em horas de temperatura em conforto e desconforto são ilustradas na figura 3. Os resultados elucidam que em grande parte dos casos a incorporação dos PCMs na envoltória da residência reduziu o desconforto e conseqüentemente melhorou o nível de conforto interno. Entretanto, em alguns casos, o modelo base se mostrou mais eficiente que quando aplicado os PCMs na edificação.

Na Figura 3, é possível observar que em todos os meses os modelos com PCM apresentaram mais horas em conforto quando comparado ao caso base, sendo que a maior diferença se encontra no mês de fevereiro, onde, o modelo com PCM 22 na parede, e na parede e cobertura, demonstram aproximadamente 30% a mais de horas em conforto em relação ao caso base. Porém, dentro do intervalo total de estudo (92 dias), o PCM 22 parede e cobertura foi o que apresentou melhores resultados, com uma média de aproximadamente 92% das horas em conforto em comparação aos demais testes realizados.

Na sequência, o PCM 22 aplicado apenas na parede manteve cerca de 83% das horas em conforto durante o verão. Tais resultados podem ser explicados por uma concentração de temperatura interna entre o intervalo de 21 e 23°C, temperaturas próximas ao do ponto de fusão do PCM 22, que contribui com o desempenho do PCM.

Portanto, visando melhorar o desempenho térmico da edificação de análise, esta seção aborda a combinação da ventilação natural noturna com o modelo referência e o melhor caso de implementação do PCM na envoltória e o ponto de fusão, no mês de dezembro, por ter apresentado o menor desempenho térmico entre os meses avaliados.

Nos resultados encontrados (Figura 4), pode ser observado que o modelo PCM 22 sem ventilação natural, concentrou a frequência de ocorrência nas temperaturas de 20°C e 21°C. Enquanto que o modelo com PCM 22 e ventilação noturna verificou-se uma frequência de ocorrência de 35% das horas na temperatura de 22°C, temperatura do ponto de fusão do PCM. Desta forma, a

ventilação noturna contribui para um aumento de aproximadamente 22% das outras em conforto térmico em relação ao modelo PCM 22. Já o efeito da ventilação noturna no caso base reduziu as horas de conforto em aproximadamente 21%, porém pode ser notado que o caso

base com ventilação noturna concentra as horas nas temperaturas de 19°C e 20°C, temperaturas inferiores a 21°C, limite de conforto inferior para o conforto adaptativo na cidade de São Paulo para o mês de dezembro.

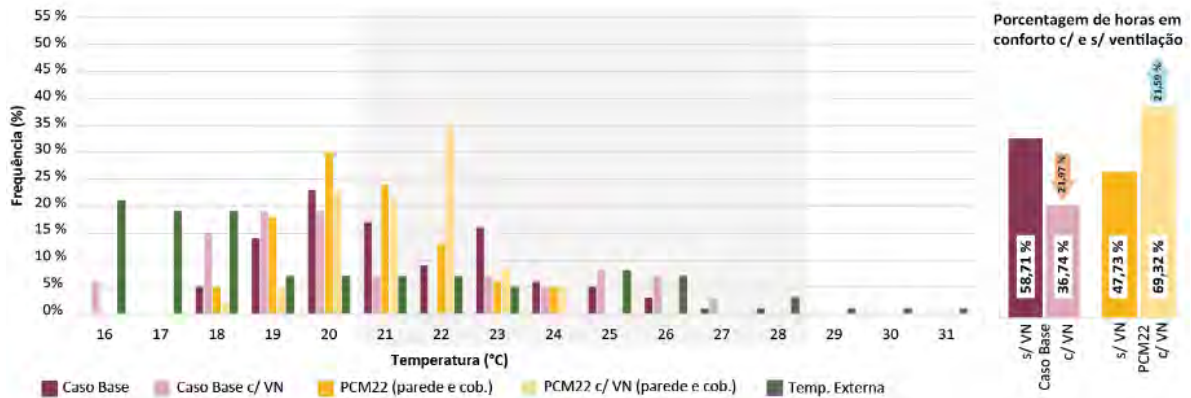


Figura 4 - Frequência de ocorrência em horas de temperatura e Porcentagem de horas com e sem ventilação em conforto para São Paulo no mês de dezembro.

### Efeito do PCMs nas temperaturas de pico

Para uma melhor compreensão do efeito da inércia térmica provocado pela aplicação do PCM na envoltória e combinação da ventilação natural noturna, foi realizada uma análise da distribuição de temperatura. Com isso, pode-se compreender o efeito da ventilação noturna no processo de ativação do PCM e sua contribuição na estabilidade da temperatura. Para isso, o dia 12 de fevereiro foi selecionado por apresentar temperaturas externas extremas, visto que em dias muito quentes apenas o efeito do PCM pode não ser capaz de remover completamente o efeito de superaquecimento.

Na figura 5, destaca-se uma amplitude térmica para o caso base de 7°C, enquanto que o modelo PCM 22 demonstrou uma variação térmica de 5°C. Sendo que às 16:00 horas

verifica-se a maior diferença de temperatura entre esses dois modelos, sendo que o modelo PCM 22 apresenta a temperatura de 24,6°C, aproximadamente 2°C inferior ao caso base. Quando se aplica a ventilação noturna, a diferença máxima de temperatura entre os modelos diminui para 1,24°C e ocorre às 14:00 horas. Em relação a ventilação noturna, também pode ser verificar que o modelo PCM 22 com ventilação noturna se mantém na temperatura de 22°C das 2:00 da manhã até às 7:00 da manhã, já o modelo PCM 22 só alcança a temperatura de 22°C às 4:00, demonstrando que nesse caso a ventilação noturna contribuiu para ativação do PCM. Por fim, a diferença máxima de temperatura entre os dois modelos ocorre às vinte e duas horas, quando o modelo PCM 22 apresenta 23,9°C, aproximadamente 3 graus superior ao modelo PCM 22 com ventilação noturna.

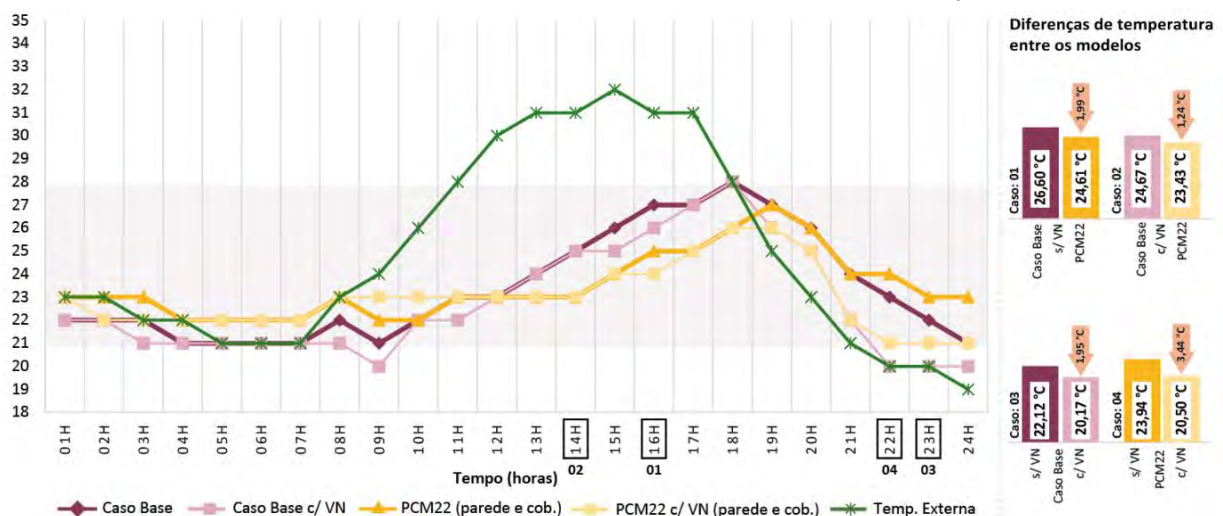


Figura 5 - Flutuações de temperatura no dia 12 de fevereiro para São Paulo

### CONCLUSÃO

Este estudo analisou o desempenho térmico de uma edificação de interesse social pré fabricada incorporada com BioPCM's (PCM 22 e PCM 25) para a cidade de São

Paulo, Brasil. Os resultados evidenciam, o PCM 22 incorporado na cobertura e parede em simultâneo, foi a situação que obteve melhor resultado e manteve quase 92% das horas em conforto. Cabe ressaltar que o PCM 22 aplicado apenas na parede manteve cerca de 83% das

horas em conforto. O clima ameno do município justifica o resultado, além da pouca variação de temperatura entre o dia e a noite, corroborando com o processo de carga e descarga do PCM. Em relação a ventilação noturna observou-se um aumento das horas dentro da faixa de conforto de 21,59% em relação ao caso base. Os resultados encontrados demonstram a aplicação do PCM em envoltórias leves contribuiu para o aumento da inércia térmica, reduzindo a amplitude térmica no interior da edificação e como consequência melhorou o conforto térmico.

## REFERÊNCIAS

- Adilkhanova, I.; Memon, S. A.; Kim, A.; Sheryev, A (2021). A novel approach to investigate the thermal comfort of the lightweight relocatable building integrated with PCM in different climates of Kazakhstan during summertime. *Energy*, 217, 119390-119401.
- Alghamdi, Sultan M.; Ajour, Mohammed N.; Abuhamdeh, Nidal H.; Karimipour, Arash (2022). Introducing a new PID controller to control the addition of PCM to the building with ventilation heat recovery installation to reduce the energy demand of the cooling system. *Journal Of Building Engineering*, 56, 104766.
- Ashrae, American society of heatingrefrigerating and air conditioning engineers (2020). *ANSI/ASHRAE Standard. 55-2020: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Atlanta: ASHRAE.
- Balanço Energético Nacional 2021: Ano base 2020 / *Empresa de Pesquisa Energética*. – Rio de Janeiro : EPE, 2021
- Baetens, R.; Jelle, B. P.; Gustavsen, A (2010). Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review. *Energy and Buildings* 42 (9), 1361-1368.
- Beltrán, R. David; Martínez-Gómez, Javier (2019). Analysis of phase change materials (PCM) for building wallboards based on the effect of environment. *Journal Of Building Engineering*, 24.
- Lei, J.; Yang, J.; Yang, E.-H (2016). Energy performance of building envelopes integrated with phase change materials for cooling load reduction in tropical Singapore. *Applied Energy*, 162, 207-217.
- Marin, P.; Saffari, M.; Gracia, A.; Zhu, X.; Farid, M. M.; Cabeza, L. F.; Ushak, S (2016). Energy savings due to the use of PCM for relocatable lightweight buildings passive heating and cooling in different weather conditions. *Energy and Buildings*, 129, 274-283.
- Mohamed, S. A.; Al-sulaiman, F. A.; Ibraim, N. I.; Zahir, M. H.; Al-ahmed, A.; Saidur, R.; Yilbaş, B. S.; Sahin, A. A. A (2017) review on current status and challenges of inorganic phase change materials for thermal energy storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 1072-1089.
- Ozdenefe, M.; Dewsbury, J (2015). Thermal performance of a typical residential Cyprus building with phase change materials. *Building Services Engineering Research and Technology*, 37 (1), 85-102.
- Piselli, Cristina; prabhakar, Mohit; gracia, Alvaro de; Saffari, Mohammad; Pisello, Anna Laura; Cabeza, Luisa F. (2020). Optimal control of natural ventilation as passive cooling strategy for improving the energy performance of building envelope with PCM integration. *Renewable Energy*, 162, 171-181.
- Rahimpour, z.; Faccani, a.; Azuatalam, d.; Chapman, a.; verbič, g. (2017). Using Thermal Inertia of Buildings with Phase Change Material for Demand Response. *Energy Procedia*, v. 121, p. 102-109.
- Ramakrishnan, sayanthan; Wang, xiaoming; Alam, morshed; Sanjayan, jay; Wilson, John. (2016). Parametric analysis for performance enhancement of phase change materials in naturally ventilated buildings. *Energy And Buildings*, 124, 35-45,
- Saffari, M.; Gracia, A.; Fernández, C.; Cabea, L. F (2017). Simulation-based optimization of PCM melting temperature to improve the energy performance in buildings. *Applied Energy*, 202, 420-434.
- Sharma, V.; Rai, A. C (2020). Performance assessment of residential building envelopes enhanced with phase change materials. *Energy and Buildings*, 208, 109664.
- Sun, Xiaoqin; Zhang, Yuan; Xie, Kun; Medina, Mario A. (2022). A parametric study on the thermal response of a building wall with a phase change material (PCM) layer for passive space cooling. *Journal Of Energy Storage*, 47, 103548.
- Souayfane, Farah; Fardoun, Farouk; Biwole, Pascal-Henry (2016). Phase change materials (PCM) for cooling applications in buildings: a review. *Energy And Buildings*, v. 129, p. 396-431.
- Soudian, S.; Berardi, U (2019). Assessing the effect of night ventilation on PCM performance in high-rise residential buildings. *Journal of Building Physics*, v. 43 (3), 229-249.
- Veiga, R. K.; Olinger, M. S.; Melo, A. P.; Lamberts, R (2019). Modelagem da ventilação natural com aplicação do objeto Energy Management System do Programa EnergyPlus. In: *Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 15.; encontro latino-americano de conforto no ambiente construído*, 11., João Pessoa, 2019. Anais [...]. Porto Alegre: ANTAC, 2019.

## INFLUENCE OF FUTURE WEATHER FILES ON NBR15575 PERFORMANCE INDICATORS

Matheus K. Bracht<sup>1</sup>, Marcelo S. Olinger<sup>1</sup>, Vanessa A. C. da Costa<sup>2</sup>,  
Ana Paula Melo<sup>1</sup>, Roberto Lamberts<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal University of Santa Catarina, Florianópolis, Brazil

<sup>2</sup>Saint-Gobain Research Brasil, Capivari, Brazil

### Abstract

The study seeks to evaluate the variation of a set of thermal performance indicators for a single-family dwelling using different future weather files for São Paulo, Brazil. The simulation method considers two conditions of building use: with natural ventilation and without natural ventilation. Results indicate that the NBR15575 standard's method is significantly sensitive to climate variation. The use of insulation brings the simulation results between the weather files closer, especially considering the minimum operative temperature indicator.

### Introduction

Studies have shown that the building sector accounts for up to 50% of global energy consumption (Santamouris & Feng, 2018). Despite considerable efforts by numerous countries around the globe to reduce energy consumption in buildings, there is still a great demand for dwellings in the world, especially in developing countries. Thus, the energy demand for buildings increased by 20% between 2000 and 2017, according to the International Energy Agency (IEA, 2019).

This situation becomes even more severe when we consider the climate changes that are already underway. Currently, 5 billion people live in areas that require mechanical cooling. This number is expected to rise to over 7 billion, considering climate change and population growth (IEA, 2022). Consequently, the IEA foresees the number of air conditioners rising from 1.5 billion to 4.4 billion by 2050, putting even more pressure on the electrical grid and demanding newer power plants.

Because of that, passive cooling strategies become even more critical in this scenario. However, this strategy is highly dependent on the climate requirements, making the design of buildings a complex and error-prone process (Alessandrini et al., 2019).

Many countries have adopted initiatives to improve building performance and energy efficiency, such as developing standards and policies. In Brazil, NBR 15575 (ABNT, 2021) defines requirements for thermal performance in residential buildings based on performance indicators obtained by building simulation.

Building energy simulation (BES) can provide performance indicators to support the design process.

BES tools require several inputs; among them, weather data are essential (Pernigotto et al., 2020). Usually, the BES community employs typical meteorological year (TMY), or typical reference year (TRY) weather files developed from historical weather data from several years ago. Considering the effects of climate change and heat islands, we may simulate buildings for climates that already present different behaviours from these weather data (Crawley & Lawrie, 2021). In this way, it becomes essential to understand the behaviour of this type of dwelling in the future, considering different scenarios, to avoid problems such as overheating and power outages (Tootkaboni et al., 2021).

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) gathers scientific knowledge from researchers worldwide and delivers assessment reports with projections for future climate. Based on different socioeconomic scenarios, general circulation models (GCMs) represent physical processes of the atmosphere, ocean, cryosphere, and land surface, estimating climate variables for future years.

From the data delivered by GCMs, future weather files for BES are created.

Among the methods available for developing future weather files, the morphing method (Belcher et al., 2005) is one of the most used for its straightforward approach. Jentsch et al. (2013) developed the CCWorldWeatherGen, a tool that applies the morphing method on TMY2 weather files based on the high emissions scenario (A2) of the IPCC's 4th assessment report.

However, other methods are also used, such as applying stochastic meteorological models adopted by Meteonorm. Meteonorm weather files are based on the fifth assessment report from IPCC, which has the representative concentration pathways 8.5 (RCP8.5) as the highest emissions scenario.

This study evaluates the effect of using different future weather files on the NBR15575 performance indicators for a single-family dwelling. The work analyses the periods of 2020, 2050 and 2080 for São Paulo, Brazil. The EnergyPlus simulation program was used to estimate the cooling and heating loads and the maximum and minimum operative temperature during a natural ventilation regime.

## Method

The method is described in the following subsections, detailing the weather files used, the characteristics of the base building, the different parameters adopted in the three cases analysed, and the simulation method considered.

### Future weather files

For this study, three different weather files were used as a source. Two of them were developed with the CCWorldWeatherGen tool. The tool's methodology uses weather files in EPW format as the input data and the HadCM3 experiment as the General Circulation Model (Jentsch et al., 2012).

The methodology used in the HadCM3 experiment recommends the use of input weather files from the period between 1961 and 1990. Thus, two different weather files were used as input:

1. TRY (Typical Reference Year) weather file from 1954 for the city of São Paulo, available at Climate One Building (Crawley & Lawrie, 2022).
2. The weather file developed within the SWERA (Solar and Wind Energy Resource Assessment) project, which is available at the LabEEE website (LabEEE, 2022a). The SWERA weather file is developed as a TMY (Typical Meteorological Year) covering the observed period from 1974 to 1997.

Thus, the TRY file is based on earlier observations than the recommended period. In contrast, the SWERA file is based on a later period than that recommended by the CCWorldWeatherGen method. The scenario used by CCWorldWeatherGen is the A2 from the IPCC's AR4 report.

Weather files developed using Meteonorm for the RCP8.5 scenario of the IPCC report AR5 were also used for comparison.

For the assessment, all future weather files have been developed for the 2020, 2050 and 2080 periods. Dry bulb temperature, global horizontal radiation and wind direction were analysed to understand the differences related to the data source (TRY, SWERA and Meteonorm) and the differences between each period.

### Building typology

The simulated building is a single-family house with two bedrooms, a living room with a combined kitchen and a bathroom, with a total area of 44.99 m<sup>2</sup> and 2.50 m of ceiling height (Figure 1). Its geometric features were based on the characterisation of representative Brazilian building typologies published by Triana et al. (2015).

Natural ventilation in the building occurs through sliding windows, with an opening factor for ventilation of 45%, except for the bathroom window, which has an opening factor of 90%. The windows do not have external shading, and the roof system does not have overhanging eaves. The internal loads of equipment and lighting definitions and

the temperature setpoint, use and occupation schedules follow the standards established by NBR15575. The complete Input Data File (IDF) used for the EnergyPlus simulation can be found on the LabEEE website (LabEEE, 2022b).



Figure 1: Simulation model and floor plan of the considered typology.

### Definition of simulation cases

Based on the typology of the building presented, three different cases of building envelope systems were defined: (1) concrete walls and a roof constituted of a concrete slab with fibre cement tiles (NBR 15575 reference building); (2) a steel frame structure without insulation in the walls and with an insulated roof system; and (3) an insulated steel frame structure both in the external walls and roof system, without insulation in the internal walls. The thermal properties of the building components used in each of these cases are presented in Table 1. Values for the thermal transmittance are calculated according to the EnergyPlus output table.

Table 1: Thermal properties of building components used in the simulated cases.

Case	Component	U* (W/m <sup>2</sup> K)	TC** (kJ/m <sup>2</sup> K)	a (-)
1	Internal wall	3.371	220	-
	External wall	4.835	220	0.58
	Roof	2.417	220	0.65
2	Internal wall	1.963	25	-
	External wall	2.290	23	0.58
	Roof	0.357	34	0.37
3	Internal wall	1.963	25	-
	External wall	0.516	23	0.58
	Roof	0.357	34	0.37

\*U = Transmittance (U-Factor with Film from EnergyPlus' outputs)

\*\*TC = Thermal capacity

Cases 2 and 3 have a roof with gypsum ceiling, with 100 mm thermal insulation (glass wool) and CRFS tiles, internal walls composed of plasterboards with a steel frame profile of 70 mm (considered as an air layer), and external walls composed of plasterboard on the inner side and plasterboard resistant to moisture and suitable for outdoor areas on the outer side, with a steel frame profile of 70 mm. Case 3 considers glass wool in between the plasterboard layers instead of air.

The transparent elements in the window frames were considered according to the indications for the reference

model of NBR15575. The solar heat gain coefficient is 0.87, and the thermal transmittance is 5.70 W/(m<sup>2</sup>.K).

**Simulation method**

The NBR15575 simulation method was used, which considers two conditions of use: with natural ventilation and without natural ventilation. Natural ventilation strategies are considered, associated with quantifying the thermal load to be removed when ventilation is insufficient to obtain adequate thermal conditions. The standard’s method established a limit of the operative temperature of 26°C for São Paulo’s present-day weather file. This setpoint is used to calculate the thermal load indicators as the limit for using natural ventilation strategies. The temperature limit was also set for future scenarios, disregarding any acclimatization process that could occur.

The performance indicators CgTR (cooling load), ToMax (maximum annual operating temperature) and ToMin (minimum annual operating temperature) were analysed. The program EnergyPlus version 22.2 was adopted for the computer simulation.

**Results**

**Future weather files**

Figure 2 presents dry bulb temperature distributions for the weather files used in this study. Mean temperatures from 2020 to 2080 increase by 3.3 °C for the SWERA and TRY weather files and 2.8 °C for the Meteonorm weather file. It is also noted that SWERA temperatures spread wider, although mean values vary within the 1°C range for the three different sources in each period. For this reason, SWERA weather files have the lowest and highest temperatures.

When analysing global horizontal radiation (Figure 3), mean values also tend to increase in the future. From 2020 to 2080, the mean value of daily solar radiation increased by 169 Wh/m<sup>2</sup> for the SWERA weather file, 166 Wh/m<sup>2</sup> for the TRY weather files, and 112 Wh/m<sup>2</sup> for the Meteonorm weather file. Unlike the dry bulb temperature variable, SWERA maximum daily values for global horizontal radiation are the lowest compared to the TRY and Meteonorm weather files. Although global horizontal radiation values increase towards the future, the difference between mean daily values obtained for each source is more significant than the differences found between the periods. The daily mean values for the years 2020 and 2080 are 4601 Wh/m<sup>2</sup> and 4770 Wh/m<sup>2</sup> for the SWERA weather file, 4900 Wh/m<sup>2</sup> and 5012 Wh/m<sup>2</sup> for the Meteonorm weather file, and 5117 Wh/m<sup>2</sup> and 5283 Wh/m<sup>2</sup> for the TRY weather file.

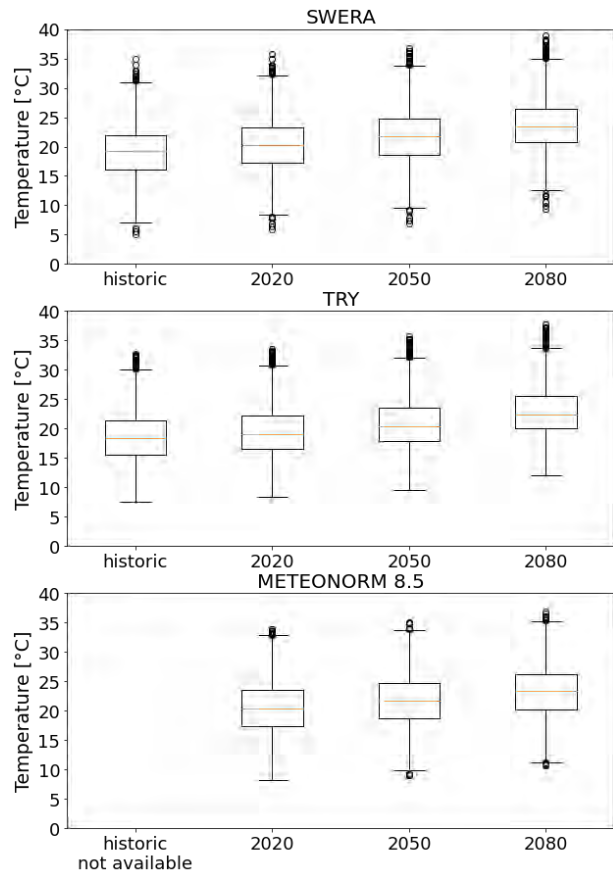


Figure 2: Dry bulb temperature box plot for each weather file generated.

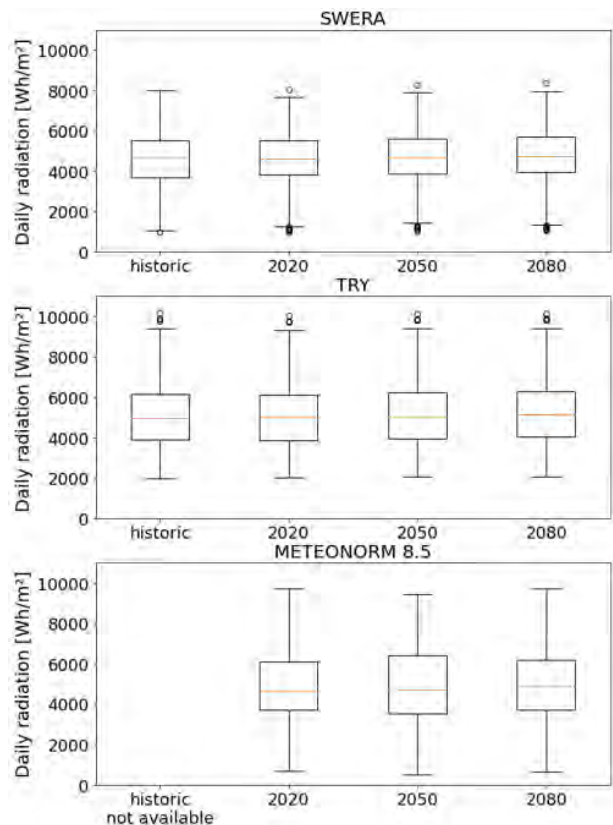


Figure 3: Solar radiation box plot for each weather file generated.

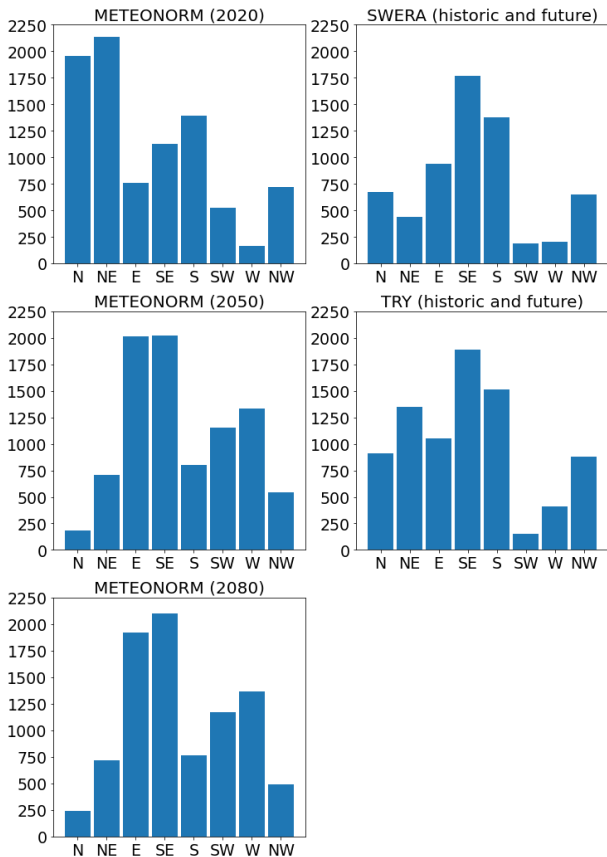


Figure 4: Wind directions in each weather file generated.

Wind direction is not included in the method applied by CCWorldWeatherGen, so the SWERA and TRY future weather files have the same values for this variable in every period. In the case of the method applied in developing the Meteonorm weather files, the wind direction was considered, so the values for this variable change for each period. Figure 4 presents histograms with occurrences of the eight main cardinal directions. It is noticed that wind direction distribution is not consistent among the three sources, although occurrences are more frequent in N, NE, SE, and S directions. It is important to mention that some values of wind direction are associated with wind speed of value zero. These values were excluded from the analysis since this could lead to biased conclusions. In the SWERA weather file, for instance, wind direction is considered N every hour when wind speed is zero. Therefore, although the file contains 3196 hours with direction N, only 673 hours from these have wind speeds above zero.

**Building’s performance indicators**

There is an increase in cooling load values over time. The most pronounced increment in the absolute cooling load's value can be seen in Case 1 (Figure 5). However, the most significant percentage increase from 2020 to 2080 was obtained when considering Case 3 (Table 2). The percentage increase differs depending on the weather file considered. For Case 1, the TRY showed the most

significant increase, while the SWERA returned the largest values for Cases 2 and 3.

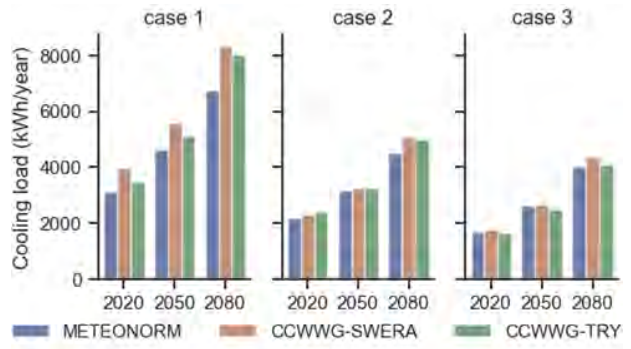


Figure 5: Cooling loads for each case.

It is noticeable, in Case 1, that the thermal load estimated using the Meteonorm file is smaller than the others. Next comes CCWWG-TRY and, finally, CCWWG-SWERA, with the highest values. This sequence is altered when considering Cases 2 and 3. It indicates that the variation of values of the weather file parameters interacts differently with distinct building envelopes.

Table 2: Cooling loads percentage increase from 2020 to 2080.

Cas e	Meteonorm	SWERA	TRY
1	115%	110%	130%
2	106%	121%	109%
3	134%	147%	147%

As for the maximum operative temperatures, an increase in values over time is also observed (Figure 6). Cases 1 and 2 have the highest values, while Case 3, more insulated, has the lowest values. In this indicator, the use of the Meteonorm file presented the lowest values of maximum temperature in all cases, presenting a less pronounced increase between 2050 and 2080. The SWERA and TRY cases presented very similar values, with TRY showing slightly lower values.

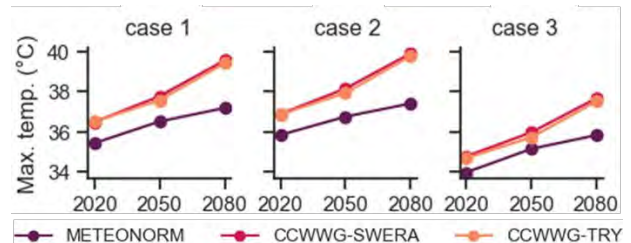


Figure 6: Maximum operative temperature for each case.

The minimum operative temperature also showed a tendency to increase with the warming of the local climate (Figure 7). This indicator obtained the highest minimum temperatures using the CCWWG-TRY file. As Case 3 presents more insulation from the external weather, it returned much closer values between the different weather files.

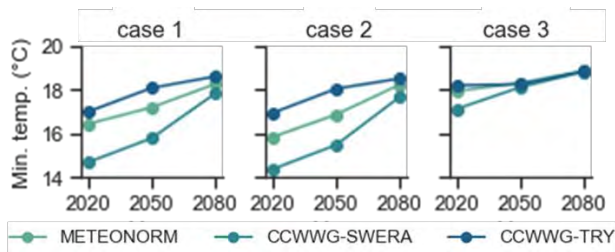


Figure 7: Minimum operative temperature for each case.

Table 3 demonstrates more clearly the uncertainty increasing of the maximum operative temperature and cooling loads as the scenarios go further in the future. In general, the lower Standard Deviation values occur in the Case 3 envelope for cooling loads and the minimum and maximum operative temperature. On the other hand, the minimum operative temperature’s uncertainty decreases for the scenario of 2080 in all cases.

Table 3: Standard deviation values for each indicator.

Time slice	Case	Cooling (kWh/year)	Max temp (°C)	Min temp (°C)
2020	1	417.5	0.61	1.20
	2	97.2	0.60	1.29
	3	54.9	0.44	0.56
2050	1	464.8	0.68	1.16
	2	55.8	0.75	1.28
	3	75.4	0.42	0.10
2080	1	848.8	1.33	0.38
	2	303.8	1.40	0.42
	3	187.4	1.02	0.02

## Discussion

BES results depend on the combination of different weather variables, and the importance of each variable depends on the modelling approaches, the performance indicators used in the analyses, or/and on the building materials and operation.

For instance, depending on the modelling approach, natural ventilation simulation may consider wind direction on the air pressure distribution around the building so that wind direction data will impact air change inside the building and, consequently, internal temperatures. In that case, even if dry bulb temperature and solar radiation indicate that one weather file is milder, cooling load results may be more significant when wind direction and speed are not contributing to the natural ventilation strategy.

In the case of building materials and operation, solar radiation could be more relevant in cases where the envelope has higher solar absorptance. Also, this impact would be different if the occupation in the building is either diurnal or nocturnal.

By comparing the results of minimum and maximum temperatures, SWERA weather files present the highest values for the maximum and the lowest for the minimum. These results agree with the minimum, and maximum values observed for dry bulb temperature among the studied weather files. However, the relation to the weather

files is not so clear when cooling loads are analysed, as these values are almost equal to or even lower than TRY's values for some cases. SWERA's mean dry bulb temperature values are relatively close to the mean values obtained for TRY and Meteonorm, and SWERA's global horizontal radiation values are lower. Therefore, it is difficult to define the consequences of future weather changes in building performance without BES.

## Conclusion

The study analyses the effect of the results of the NBR15575 indicators when considering different future weather files. The standard's method is significantly sensitive to weather variation as it considers natural ventilation strategies.

It was possible to observe a more pronounced variation in the simulation results when heavier envelopes were considered, with higher thermal inertia and less insulation. The use of insulation brings the results between the weather files closer, especially considering the minimum operative temperature indicator.

When used in energy simulation, future weather files return different results when compared to each other, depending on the envelope type. As the energy simulation depends on a combination and interrelation of several climatic variables, it is not easy to point out a single indicator to characterise the weather file used, especially for cases considering natural ventilation.

The investigation still needs to be extended to consider more current methodologies for creating future weather files, for example, using methods involving different Regional Circulation Models available in the CORDEX initiative. Comparison with different emission scenarios is also important to consider developing more robust building energy policies.

## Acknowledgement

The authors would like to thank Saint-Gobain Research Brasil and the Brazilian National Council for Scientific and Technological Development (CNPq) for the financial resources invested in the development of this research. This work was also supported by the Brazilian Federal Agency for the Support and Evaluation of Graduate Education - Brazil (CAPES) - Financing Code 001.

## References

- Alessandrini, J. M., Ribéron, J.; da Silva, D. (2019). Will naturally ventilated dwellings remain safe during heatwaves? *Energy and Buildings*, 183, 408–417. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.10.033>
- ABNT. (2021). NBR 15575-1: Edificações habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos Gerais. Rio de Janeiro.
- Belcher, S. E., Hacker, J. N., & Powell, D. S. (2005). Constructing design weather data for future climates. *Building Services Engineering Research and Technology*, 26(1), 49–61. <https://doi.org/10.1191/0143624405bt112oa>



- Crawley, D; Lawrie, L. (2021). Our climate conditions are already changing – Should we care? Building Services Engineering Research and Technology, v. 42, n. 5, p. 507-516. <https://doi.org/10.1177/0143624421100427>.
- Crawley, D; Lawrie, L. (2022). Climate. onebuilding.org. URL: <http://climate.onebuilding.org>, accessed: November 2022.
- IEA. (2019). Perspectives for the clean energy transition. The critical role of buildings. URL: <https://www.iea.org/reports/the-critical-role-of-buildings>, accessed: November 2022.
- IEA. (2022). World Energy Outlook. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>, accessed: November 2022.
- Jentsch, M. F; Bahaj, A. S; James, P. A. B. (2012). Manual. CCWorldWeatherGen. Climate change world weather file generator – Version 1.7. URL: [https://blog.soton.ac.uk/serg/files/2013/06/manual\\_weather\\_tool.pdf](https://blog.soton.ac.uk/serg/files/2013/06/manual_weather_tool.pdf), accessed: November 2022.
- Jentsch, M. F., James, P. A. B., Bourikas, L., Bahaj, A. B. S. (2013). Transforming existing weather data for worldwide locations to enable energy and building performance simulation under future climates. Renewable Energy, 55, 514–524. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.12.049>
- LabEEE. (2022a). Downloads. Arquivos climáticos em formato TRY, SWERA, CSV e BIN. URL: <https://labece.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/formato-try-swera-csv-bin>, accessed: November 2022.
- LabEEE. (2022b). NBR 15575-2021 - Desempenho térmico. Arquivo de simulação exemplo (residência unifamiliar – modelo de referência). URL: [https://labece.ufsc.br/sites/default/files/documents/id\\_fs-modelo.rar](https://labece.ufsc.br/sites/default/files/documents/id_fs-modelo.rar), accessed: November 2022
- Pernigotto, G., Prada, A.; Gasparella, A. (2020). Extreme reference years for building energy performance simulation. Journal of Building Performance Simulation, 13(2), 152–166. <https://doi.org/10.1080/19401493.2019.1585477>
- Santamouris, M; Feng, J. (2018). Recent progress in daytime radiative cooling: is it the air conditioner of the future? Buildings 8(12). <https://doi.org/10.3390/buildings8120168>
- P. Tootkaboni, M., Ballarini, I., Zinzi, M.; Corrado, V. (2021). A comparative analysis of different future weather data for building energy performance simulation. Climate, 9(2), 1–16. <https://doi.org/10.3390/cli9020037>
- Triana, M. A.; Lamberts, R.; Sassi, P. (2015). Characterisation of representative building typologies for social housing projects in Brazil and its energy performance. Energy Policy, v. 87, p. 524–541. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.08.041>

## PHASE CHANGE MATERIALS APPLICABILITY IN BRAZILIAN RESIDENTIAL ROOFS

Larissa Pereira de Souza<sup>1</sup>, Matheus Körbes Bracht<sup>1</sup>, Matheus Soares Geraldi<sup>1</sup>, Mateus Bavaresco<sup>1</sup>, Ana Paula Melo<sup>1</sup>, Roberto Lamberts<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal University of Santa Catarina, Florianópolis, Brazil

### Abstract

The study evaluated thermal performance indicators when considering the use of PCM-enhanced tile in comparison to traditional roof systems. Building energy simulation was employed in an example dwelling in São Paulo and São Luís. Results showed the decrease in thermal load and the maximum operative temperature when the PCM was employed for both cities. It also indicates that lighter roof systems can be interesting solutions to provide high thermal performance in some conditions, especially when only natural ventilation is available at night.

### Introduction

The effects of climate change pressures the development of technological solutions in different sectors. The search for materials, building components and innovations that make the construction sector more aligned with sustainable development is a challenge for today's society.

In this sense, residential buildings have a special role. In addition to being the most significant percentage of the built-up stock (80% of the built-up area in the world) (SANTAMOURIS AND VASILAKOPOULOU, 2021), they also have a severe deficiency in providing adequate living conditions. The United Nations (UN) estimates that more than 300,000 people in Brazil inhabit unhealthy places. By unhealthy, the UN means places that do not provide adequate protection to the inhabitant because they are too hot, too cold (or both), or because they provide inadequate lighting, low acoustic performance, and low air renewal, among other factors. These conditions might cause occupants illness (KING et al., 2017).

The Survey of Possessions and Habits (PPH) carried out in 2019 by Eletrobras, within the scope of Procel, reveals that residents can see the roof tiles directly from inside the building in 45.63% of Brazilian homes. This outcome indicates that such a roof system does not include slabs or ceilings (PROCEL, 2019).

This data evidences a problem since the most significant heat exchange occurs through the roof in single-family residential buildings (usually one or two storeys). The concrete slab stands out in the Brazilian construction sector for its thermal capacity, which gradually transfers heat into the building (higher thermal inertia).

A low thermal capacity provides significant heat exchange fast, making indoor environments susceptible to heat spikes and increasing indoor thermal load (BAVARESCO et al., 2022; PEREIRA DE SOUZA et al., 2022). Regarding resilience in the built environment, it is important to avoid heat spikes because, during an excessive and sudden increase in the temperature of a place (heat waves), there are risks to people's health (HADDAD et al., 2022). Since heat waves are expected to be more frequent due to climate change, resilience is a factor that must be taken into account.

Air conditioning is a way to provide thermal comfort to people. However, using air conditioning implies high energy consumption, and the cost of the appliance itself is a financial burden for many low-income families. Passive energy efficiency strategies should be encouraged to avoid excessive energy consumption and active strategies (IEA, 2022).

Nonetheless, conventional materials and envelope components, such as concrete slabs, take time to construct or increase the structural stress. The retrofit of building a concrete slab can be unfeasible in already-constructed houses. Thus, developing alternative solutions to provide households' roofs with thermal capacity can boost the conservation of natural resources and time.

Meanwhile, some studies show that using Phase Changing Materials (PCM) in construction can increase the building component thermal capacity (BRE et al., 2022; CARLUCCI et al., 2021).

A PCM has a melting point within the range of variation occurring at the Earth's surface. It means the material changes its phase from solid to liquid under a daytime temperature. It is important to emphasize that the latent heat (energy needed to change phase) is much greater than the sensible heat (energy needed to change the material temperature by 1°C). Thus, during the melting period, it can store the heat energy to change phase from solid to liquid, maintaining the same temperature during the process. When the air temperature reaches lower levels, the PCM releases the heat energy stored by changing the phase from liquid to solid.

When used in building envelopes, PCMs store the energy that would be transferred indoors by maintaining its melting point temperature for a certain period. In short, the material needs much more energy to change its phase than to elevate its temperature since the temperature

remains constant during the phase-changing process. Thus, PCM applications are excellent alternatives to store energy in building envelopes (KALBASI, 2022).

Therefore, this work aims to evaluate the possibility of improvement of the thermal performance of Brazilian housing by using PCMs in roofs to grant thermal capacity.

### Simulation and experiment

Building performance simulations were carried out using EnergyPlus (version 22.2) to evaluate the solutions' effectiveness in terms of the housing's thermal performance criteria. The evaluation and modelling criteria were based on the Brazilian Performance Standard for Housing Buildings, NBR 15.575:2021.

The example building used for the analysis consists of a single-family house with 57.36 m<sup>2</sup>, two bedrooms, a bathroom and a combined living room and kitchen, as presented in Figure 1.

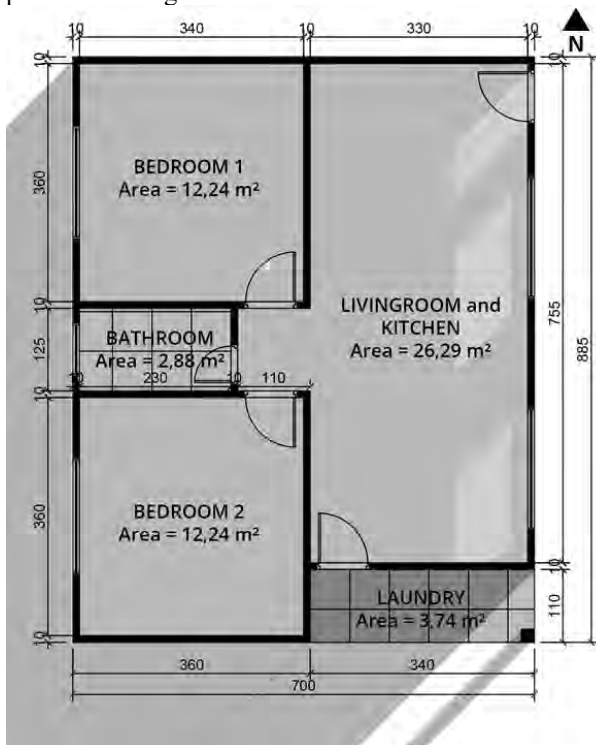


Figure 1: Blueprint of the residential building analyzed

The simulations were performed based on the method of NBR 15575:2021. Figure 2 presents the 3D representation of the energy model used.

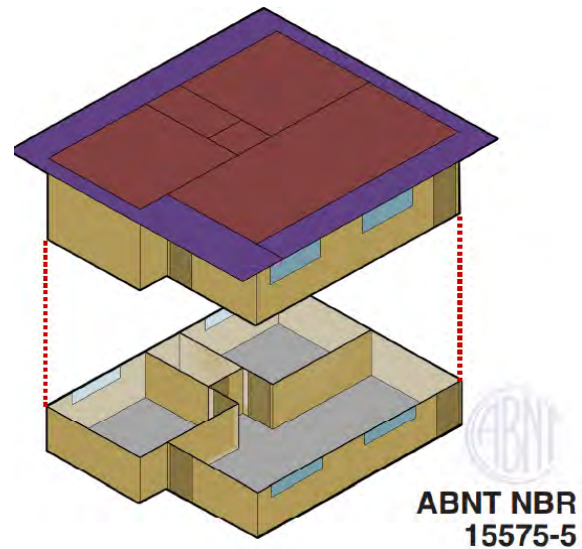


Figure 2: Energy model of the residential building

Initially, a reference model was set according to the requirements from NBR 15.575:2021. Such requirements are valid for constructive parameters (i.e. floor, wall openings, ground contact) and occupancy-related aspects (i.e. the number of inhabitants, equipment/lighting power, and occupancy patterns). The model considered all configurations according to the NBR 15.575:2021, besides the roof, which was changed according to the experiment. The model considered all configurations according to the NBR 15.575:2021, besides the roof, which was kept equivalent for both climate zones.

Regarding climate analysis, Brazil has an extensive area, and the climate regions vary from extremely hot and humid places to warm and humid places. Therefore, two cities and climates were evaluated: São Paulo, located in a hot and humid climate region (Climatic Zone 2A), and São Luís, located in an extremely hot and humid region (Climatic Zone 0A), according to ASHRAE 169-2013. The weather files are Typical Meteorological Years considering 2007-2021, available at Climate One Building (CRAWLEY & LAWRIE, 2022).

Then, changes to such reference models were made according to Figure 3. Such modifications comprise combinations of roof conditions.

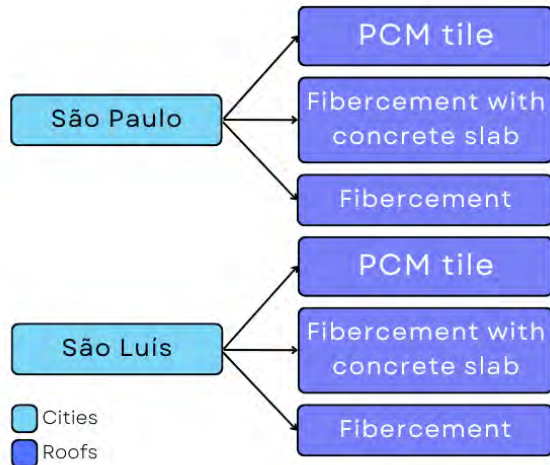


Figure 3: Roof cases

Three envelope combinations were performed for two Brazilian cities, totaling six cases and 12 simulations as each case was simulated considering natural ventilation and mechanical cooling strategies.

The envelope combinations were based on one wall type (concrete, according to the reference wall from NBR 15.575:2021) and three different roof systems (fibercement tile, fibercement tile with concrete slab and a macro encapsulated PCM insulated tile). The thermal properties of these envelope compositions are described in Table 1. The fibercement tile was considered with two variations of solar absorptance ( $\alpha$ ), as shown in Table 1.

Table 1: Thermal properties of the materials used in the simulated cases

Material	Concrete slab	Fibercement tile ( $\alpha = 0.65$ )	Fibercement tile ( $\alpha = 0.27$ )	PCM
Thickness (cm)	10	0.600	0.800	0.526
Conductivity (W/m.K)	1.75	0.650	0.343	0.200
Density (kg/m <sup>3</sup> )	2200	1700	1690	880
Specific heat (J/kg.K)	1000	840	840	2000

For all cases, the transparent elements in the frames were considered according to the indications for the reference model of NBR 15.575:2021. The solar factor is 0.87, and the thermal transmittance is 5.70 W/(m<sup>2</sup>.K).

Notably, the PCM-enhanced tile is presented as an innovative component for the local market. Such a tile is based on a combination of the following layers: a low-absorptive fibercement tile (8 mm), EPS (25 mm), and macroencapsulated PCM (5 mm). Figure 4 represents how the PCM-enhanced tile was modelled in EnergyPlus, layer by layer. The EPS layer with 25 mm was set with a thermal resistance of 0.59 m<sup>2</sup>.K/W.

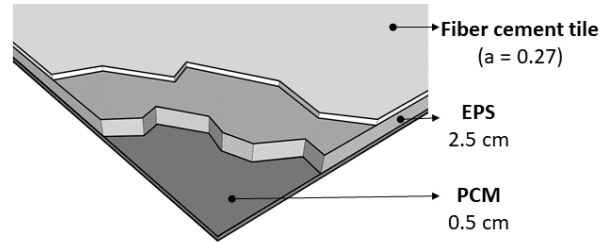


Figure 4: PCM roof tile configuration in EnergyPlus

The PCM adopted was based on an international manufacturer employing organic materials, which was tested by Bre et al. (2022). The PCM has the following enthalpy curve, as presented in Figure 5.

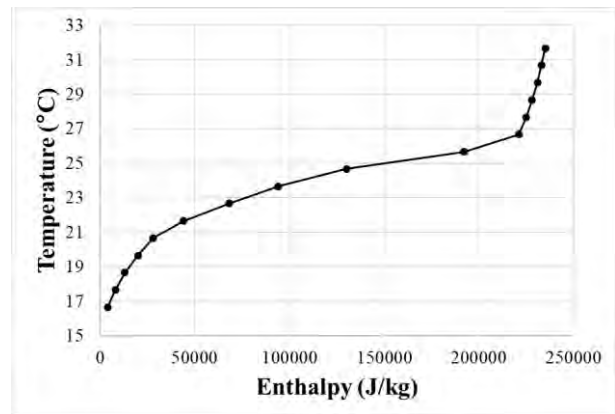


Figure 5: PCM enthalpy curve

The air chamber in the roofs composed of fibercement with a concrete slab was set with a thermal resistance of 0.21 m<sup>2</sup>.K/W.

The total thermal load of the building in each case was compared to evaluate possible reductions in energy consumption. The thermal load predicted the cooling and heating consumption necessary to maintain the building in a suitable temperature range for the inhabitants when natural ventilation strategies are not enough. This limit setpoint to start the mechanical cooling depends on the climate (26°C for São Paulo and 28°C for São Luís). The total thermal load parameter is also one of the criteria evaluated by NBR 15.575:2021.

Maximum operative temperature, on the other hand, shows the maximum temperature achieved when only natural ventilation is considered — in this way, demonstrating the resilience of the building when facing an energy outage or when active cooling is not available. Maximum operative temperatures were also evaluated as thermal resilience indicators of all the simulated dwellings. Again, such evaluations were based on the requirements from NBR 15.575:2021.

In short, each envelope case was analyzed regarding the thermal load and the maximum operative temperature to determine the impact of a PCM-enhanced tile in Brazilian climates.

## Discussion and result analysis

In all cases, PCM-enhanced tile reduces the total thermal load compared to the other conventional solutions tested. The other roof systems provide different conditions depending on the climate. For instance, roofs with a concrete slab resulted in improved thermal loads for both cities compared to roofs composed only of fibercement tiles. In any case, the roof systems with PCM consistently deliver a better thermal condition, regardless of the climate. Such a trend is evident by comparing São Paulo and São Luís results. Figure 6 represents results for São Paulo and Figure 7 for São Luís. Both graphics represent the total thermal load in bars and the maximum operative temperature as the circles.

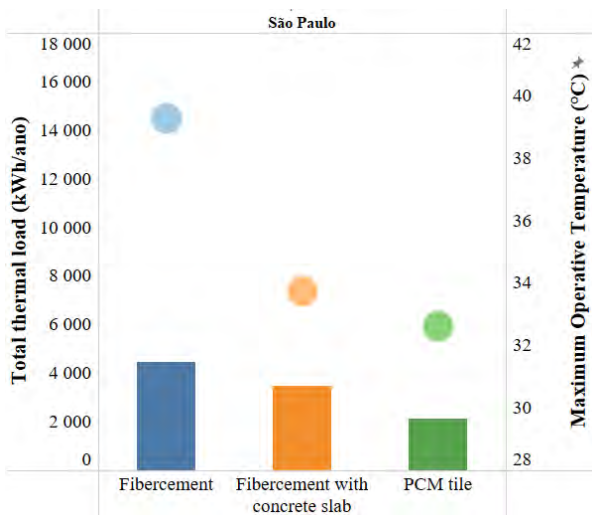


Figure 6: Thermal load and maximum operative temperature results for São Paulo

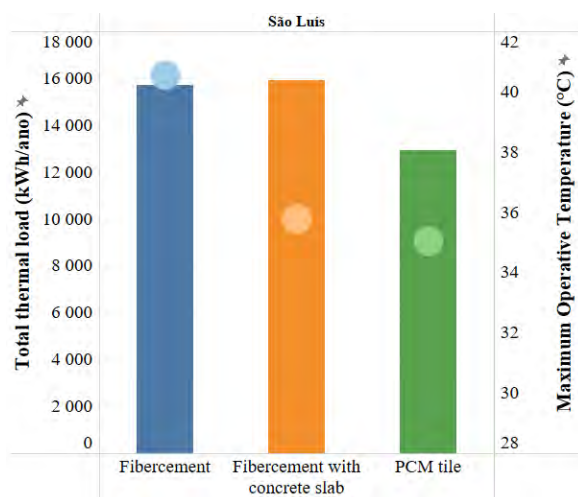


Figure 7: Thermal load and maximum operative temperature results for São Luís

Regarding the results of the maximum operative temperature predicted for each system, the PCM-enhanced tile presents a better performance concerning the maximum operative temperature. It is important to highlight that for this indicator, the solution using only

fibercement tiles always performs worse than the concrete slab or PCM cases.

When analyzing the living room temperature over a day considering only natural ventilation in São Paulo (Figure 8) and São Luís (Figure 9), PCM-enhanced tile led to lower thermal amplitude than other roofing systems. The horizontal red line indicates the setpoint temperature for each case. In addition, the PCM system maintains milder temperatures within a range closer to what is comfortable for the inhabitants.

Cases using only the fibercement tile show lower temperatures during the night, despite the higher temperatures close to midday. As they have lower thermal inertia and thermal transmittance, the indoor temperature stays more comparable to the external air temperature. These patterns can be useful for hot climates with lower night temperatures, especially for the dwelling's bedrooms.

For São Luís, one can observe that the period which the operative temperature is lower than the setpoint temperature (28°C) is extremely short: only in the first hours of the morning. Thus, the building's users would use active cooling systems for the rest of the day for all cases, according to the NBR 15.575:2021 methodology.

Besides, the PCM-enhanced tile's outputs throughout the day are similar to the fibercement with a concrete slab. However, the results of operative temperatures are lower in the case considering PCM. This result emphasizes the feasibility of combining PCM and insulation materials. Insulation materials must be placed as an outside layer (near the exterior), while the PCM must be placed in an inside layer. Thus, the constructive component can minimize heat gains while guaranteeing thermal inertia to the building roof.

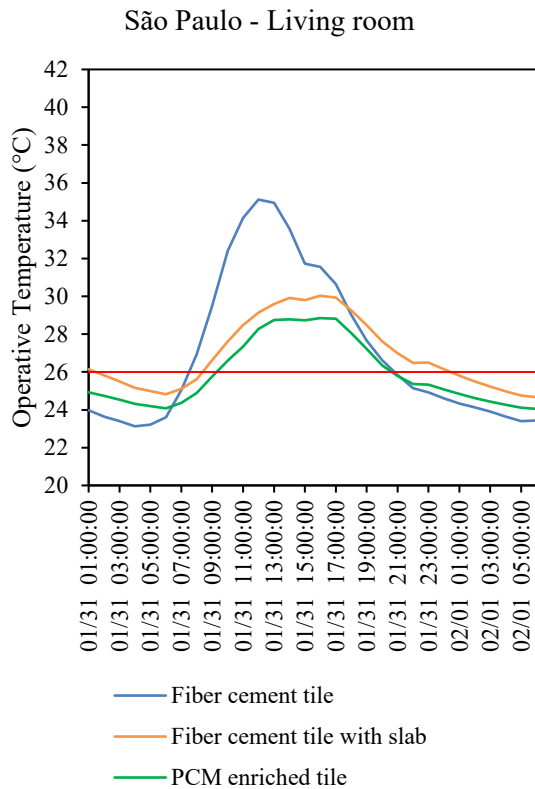


Figure 8: São Paulo – Operative temperature variation in a day

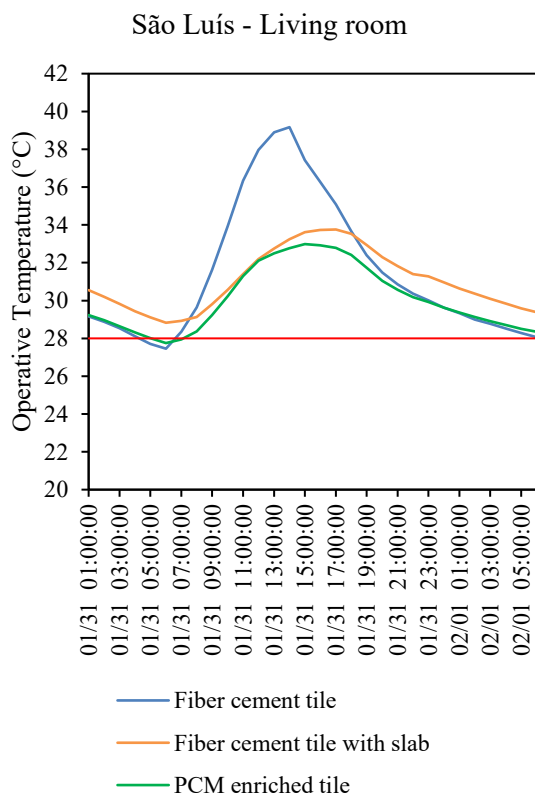


Figure 9: São Luís – Operative temperature variation in a day

In summary, using PCM on the roof reduces the need for heavy construction elements, such as concrete slabs. It can contribute to reducing the potential carbon footprint of the construction of the building (as it reduces the use of concrete) and also release some of the structure weight needed when considering a concrete slab (since it uses lighter materials). Nonetheless, this potential of reducing the carbon footprint is maximized when the PCM material is produced using local and renewable (and bio-based) materials.

### Conclusion

The study showed the thermal performance of the PCM-enhanced tile compared to traditional roof systems used in the Brazilian construction sector. Both total thermal load and maximum operative temperature demonstrated that PCM-enhanced tile provided lower values for São Paulo and São Luís climates.

The investigation also demonstrated that using concrete slabs in hot climates can increase the cooling load values despite reducing the maximum operative temperature. When combined with the results of the operative temperature throughout the day, it was possible to verify that the operative temperatures during the night were lower for the case using only the fibercement tile. This balance between different performance indicators is an important research avenue when considering climate change and the need to reduce the environmental impact of buildings while maintaining the inhabitants safe.

It is important to emphasize that the comparisons were performed with standard fibercement tiles with higher solar absorption values than the PCM-enhanced tile. The use of more reflective tiles can be an essential future work to evaluate the effectiveness of PCM against the use of cool materials, for example.

In summary, the work demonstrated positive preliminary results for using PCM in two Brazilian climates considering passive and active cooling strategies in a dwelling. It also drew attention to the need for a better understanding of the roof system’s impact on the building’s thermal behavior, especially in extremely hot climates.

### Acknowledgement

This work was supported by the Brazilian National Council for Scientific and Technological Development (CNPq).

### References

ABNT. (2021). NBR 15575-1: Edificações habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos Gerais [Brazilian Performance Standard for Housing Buildings]. Rio de Janeiro.

ASHRAE (2013). ASHRAE 169-2013 Climatic Data for Building Design Standards.

Bavaresco, M.; Kamimura, A.; Geraldi, M. S.; Melo, A. P.; Lamberts, R (2022). Impacto da ausência de forros ou lajes no desempenho termoenergético de habitações de interesse social. ENCONTRO

NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2022.

- Bre, F.; Caggiano, A.; Koenders, E. A. B. (2022). Multiobjective Optimization of Cement-Based Panels Enhanced with Microencapsulated Phase Change Materials for Building Energy Applications. *Energies* 15, 5192. <https://doi.org/10.3390/en15145192>
- Carlucci, F.; Cannavale, A.; Triggiano, A.A.; Squicciarini, A.; Fiorito, F. Phase Change Material Integration in Building Envelopes in Different Building Types and Climates: Modeling the Benefits of Active and Passive Strategies. *Appl.Sci.*2021,11, 4680. <https://doi.org/10.3390/app111046>
- Crawley, D; Lawrie, L. (2022). Climate. onebuilding.org. URL: <http://climate.onebuilding.org>, accessed: November 2022.
- IEA. (2022). World Energy Outlook. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>, accessed: November 2022.
- Haddad, S., Paolini, R., Synnefa, A., De Torres, L., Prasad, D.; Santamouris, M. Integrated assessment of the extreme climatic conditions, thermal performance, vulnerability, and well-being in low-income housing in the subtropical climate of Australia. *Energy and Buildings*, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112349>
- Kalbasi, R. (2022). Usefulness of PCM in building applications focusing on envelope heat exchange – Energy saving considering two scenarios. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 50. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101848>
- Pereira de Souza, L.; Costa, V. A. C.; Melo, A. P.; Lamberts, R. O impacto do uso de isolamento na cobertura de acordo com a NBR 15575. ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2022.
- Santamouris, M., & Vasilakopoulou, K. (2021). Present and Future Energy Consumption of Buildings: Challenges and Opportunities towards Decarbonisation. *E-Prime*, 1, 100002. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2021.100002>

## O Impacto das Estratégias de Controle Solar no Desempenho Térmico de uma Edificação Residencial de acordo com a NBR 15575:2021

Júlia Bagio<sup>1</sup>, Larissa Pereira de Souza<sup>1</sup>, Ana Paula Melo<sup>1</sup>, Roberto Lamberts<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil

### Resumo

Este estudo avalia o desempenho térmico de uma casa geminada com diferentes soluções (sombreamentos e tipos de vidro). Os casos foram avaliados de acordo com o método de simulação da NBR 15575:2021 para Florianópolis e São Luís. Foram comparados: temperatura operativa máxima e mínima, carga térmica total e percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa. O vidro laminado, o brise combinado (horizontal+vertical) e o brise horizontal apresentaram melhor desempenho. Já o vidro duplo pode piorar o desempenho térmico em algumas situações. Por fim, estudos futuros poderiam avaliar o custo benefício dessas soluções.

### Introdução

O setor de edificações foi responsável por aproximadamente 36% do consumo total de energia no mundo em 2021, sendo que 22% originam-se de edificações residenciais, segundo o relatório da Organização Mundial das Nações Unidas (ONU) de 2021 "Global Status Report for Buildings and Construction". Estes valores se mantêm estáveis desde a última versão deste mesmo relatório, publicado em 2019, o que indica que poucos foram os esforços para avançar com a implementação de projetos e sistemas eficientes em energia. Ademais, verifica-se o agravante do intenso crescimento urbano relatado no mundo todo, que tende a aumentar os níveis de consumo de energia nas cidades, além de poder intensificar diversos outros problemas de escala ambiental e urbana.

Em contrapartida, os investimentos na área de eficiência energética em edificações alcançaram mais de 180 bilhões de dólares em 2020, representando um aumento de quase 40% em relação aos 129 bilhões de dólares de 2015, conforme o mesmo relatório. Resultado este do compromisso mundial para minimizar as mudanças climáticas, deliberado em 2015 pelo Acordo de Paris (ONU, 2021).

A pandemia da Covid-19, no entanto, que teve seu pico em meados de 2020 e 2021, mudou radicalmente a forma como as edificações são apropriadas pelos usuários (ONU, 2021). A modalidade de trabalho em casa (popularmente denominado "home office"), por exemplo, que foi adotada como fixa por muitas empresas no período pós-pandemia, aumentou drasticamente o

tempo que os indivíduos passam dentro das suas residências. Desta maneira, reforça-se a importância de os ambientes residenciais serem confortáveis, com controle térmico adequado e, consequentemente, eficientes em energia.

Estudos indicam, também, que em habitações de interesse social no Brasil faz-se necessário o uso de ar condicionado ou outros sistemas de condicionamento de ar para o controle térmico dessas unidades habitacionais, devido a uma ventilação natural não adequada e uma envoltória que não contribui para um maior conforto daqueles espaços (Triana, Lamberts, Sassi, 2015 apud. Pereira de Souza et. al, 2022). Este mesmo estudo conclui, também, que as edificações precisam ser adaptadas às zonas bioclimáticas onde estão inseridas e os piores resultados das análises acontecem geralmente no verão. Assim, evidencia-se a importância de estratégias de controle solar nas fachadas das edificações residenciais para evitar o seu superaquecimento, em evidência naqueles locais onde a radiação solar é abundante durante alguns períodos do ano.

Um estudo realizado por Jordão et. al (2021) analisa a influência de diferentes vidros no desempenho da envoltória de uma edificação comercial a partir da classificação de eficiência energética para as cidades de Cuiabá e Curitiba. Concluiu-se que, apesar dos casos com vidro laminado apresentarem melhores resultados, a adoção de estratégias de sombreamento também se mostrou efetiva para obter a classificação A no selo do PBE Edifica, que se baseia no método regulado pela NBR 15575:2021.

Porém, é necessário avaliar esta influência no âmbito de edificações residenciais, uma vez que estas possuem padrão de ocupação e métodos construtivos diferentes dos edifícios comerciais.

Assim, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho térmico de uma casa geminada em relação a diferentes tipos de vidros e sombreamentos para controle solar, a partir do método de simulação computacional proposto pela NBR 15575:2021. Adota-se, para estas análises, os climas das cidades de Florianópolis e São Luís. Busca-se, então, compreender os limites do desempenho térmico promovido por essas estratégias, que podem melhorar ou, então, piorar o comportamento de uma edificação residencial de interesse social, a depender do período do ano analisado.



## Método

O presente trabalho foi desenvolvido com base no método de simulação da norma de desempenho para edificações residenciais ABNT NBR 15575:2021. O processo de avaliação do desempenho térmico de unidades habitacionais consiste na análise de uma edificação real comparada a uma edificação na condição de referência. Esta condição é bastante similar à geometria original, porém com a alteração de alguns parâmetros da envoltória (como elementos construtivos da envoltória e ângulos de sombreamento). As simulações foram realizadas no EnergyPlus 22.1, e os modelos energéticos foram desenvolvidos no software SketchUp Make 2017, utilizando a ferramenta Euclid.

Assim, a metodologia para o desenvolvimento desta análise foi dividida em 4 etapas: Definição das cidades analisadas; Definição do caso base; Descrição dos casos avaliados; Análise do desempenho térmico em relação à edificação de referência.

## Definição das cidades avaliadas

A primeira cidade escolhida para a análise foi Florianópolis, em Santa Catarina, uma vez que a região é característica por ter as 4 estações do ano muito bem definidas: verão relativamente quente e bastante úmido, com dias que duram aproximadamente 13,5 horas, e inverno pouco frio e seco, com duração de incidência solar de entorno de 10,7 horas por dia (WEATHER SPARK, 2022). Assim, é possível estudar a influência das estratégias de controle solar tanto nos períodos mais quentes do ano (dezembro a março), quanto nos mais frios (junho a setembro) ou amenos (abril, maio, outubro e novembro).

Segundo a NBR 15220:2005, Florianópolis está localizada na Zona Bioclimática 3. A Figura 1 apresenta os dados climáticos de temperatura de bulbo, em azul, e a umidade relativa, em verde, que foram retirados do arquivo climático INMET (CRAWLEY & LAWRIE, 2022). Utilizou-se este tipo de arquivo climático nas simulações tendo em vista que o desenvolvimento das escalas de classificação da NBR 15575:2021 também fora baseado neste tipo de arquivo.



Figura 1: Gráfico da variação anual de temperatura de bulbo seco e umidade relativa em Florianópolis.

Como se pode notar, a cidade de Florianópolis apresenta, no verão, temperaturas médias entre 20°C e 30°C. Porém, nos meses de inverno, as temperaturas médias podem ir de 10°C a pouco mais de 20°C. Durante quase 8 meses no

ano, os dias são considerados abafados em mais de 25% do tempo. Os níveis mais altos de umidade concentram-se no mês de janeiro (27,7 dias abafados) e os mais baixos, por sua vez, são em julho (1,4 dia abafado), sendo essa variação bastante expressiva.

Em contraste ao clima de Florianópolis, optou-se por trabalhar, também, com a cidade de São Luís, Maranhão. Segundo a NBR 15220:2005, a cidade está localizada na Zona Bioclimática 8. Além disso, está muito próxima à Linha do Equador (latitude 2,53°S). O clima da cidade é característico por ser bastante quente e abafado durante todo o ano, além de ter a presença de luz solar por aproximadamente 12,1 horas por dia (WEATHER SPARK, 2022).

Os dados climáticos de São Luís também foram retirados do arquivo climático INMET 2018 (CRAWLEY & LAWRIE, 2022), e estão representados na Figura 2, com a variação de temperatura de bulbo seco em azul e a variação de umidade relativa em verde.



Figura 2: Gráfico da variação anual de temperatura de bulbo seco e umidade relativa em São Luís.

Como visto anteriormente, a cidade de São Luís não possui grandes variações de temperatura ao longo do ano. Apesar de vermos a variação de temperatura média no verão entre 24°C e pouco mais de 28°C, no que seria o período de inverno, estas temperaturas variam entre o mesmo intervalo. A umidade, por sua vez, segue esse mesmo padrão, e sua variação é muito pequena durante o ano, sendo os dias abafados durante todo o ano.

## Definição do caso base

A edificação escolhida para ser analisada consiste em uma unidade habitacional de casa geminada de dois pavimentos, com sala e cozinha separadas, dois dormitórios e um banheiro no pavimento superior. Sua área é de cerca de 61 m<sup>2</sup>, não possui vizinhos próximos (além da casa geminada ao lado) e sua representação se dá conforme as Figuras 3 a 5. A escolha por esta tipologia deve-se à sua similaridade a uma configuração de habitação de interesse social bastante comum no Brasil.

A edificação em questão está destacada em linha pontilhada vermelha em ambas as plantas baixas e cada pavimento possui pé-direito de 3,0 metros. No caso do modelo de simulação termo energética, a parede que seria de contato com a outra geminada espelhada foi considerada como adiabática (em rosa, na Figura 5).

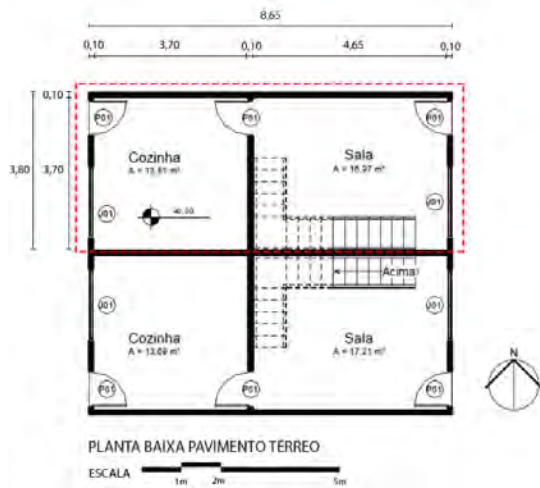


Figura 3: Planta baixa do pavimento térreo da edificação de referência.

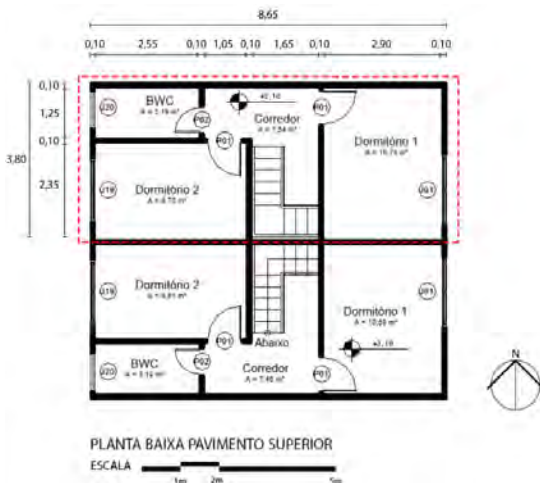


Figura 4: Planta baixa do pavimento superior da edificação de referência.

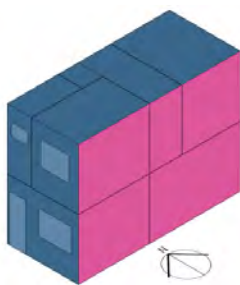


Figura 5: Perspectiva do modelo de simulação da edificação de referência.

Os parâmetros de envoltória da UH (sombreamento e propriedades térmicas) foram considerados conforme as orientações para edificação de referência da NBR 15575:2021 para a Zona Bioclimática 3, onde situa-se Florianópolis, e a Zona Bioclimática 8, para São Luís. As propriedades térmicas estão especificadas na Tabela 1, e os materiais foram modelados de acordo com as especificações da NBR 15575:2021-1, item 11.4.7.2, quanto à condutividade térmica, calor específico, absorvância à radiação solar, emissividade, densidade e

espessura. É importante ressaltar que, para o modelo de referência, as únicas propriedades que são alteradas entre os dois climas consistem na transmitância térmica e na capacidade térmica da cobertura.

Tabela 1: Propriedades térmicas da edificação de referência

Propriedades Térmicas		
	Florianópolis	São Luís
Elementos Transparentes		
Fator Solar (FS)	0,87	
Transmitância Térmica ( $U_{vid}$ )	5,70 W/(m <sup>2</sup> .K)	
Paredes		
Absortância ( $\alpha$ )	0,58	
Transmitância Térmica ( $U_{par}$ )	4,40 W/(m <sup>2</sup> .K)	
Capacidade Térmica ( $CT_{par}$ )	220 kJ/(m <sup>2</sup> .K)	
Piso		
Transmitância Térmica ( $U_{piso}$ )	3,70 W/(m <sup>2</sup> .K)	
Capacidade Térmica ( $CT_{piso}$ )	230 kJ/(m <sup>2</sup> .K)	
Cobertura		
Absortância ( $\alpha$ )	0,65	
Transmitância Térmica ( $U_{cob}$ )	2,06 W/(m <sup>2</sup> .K)	0,88 W/(m <sup>2</sup> .K)
Capacidade Térmica ( $CT_{cob}$ )	228 kJ/(m <sup>2</sup> .K)	230 kJ/(m <sup>2</sup> .K)

#### Definição dos casos avaliados

As estratégias para melhorar o desempenho térmico da edificação foram divididas em 2 categorias: elementos de sombreamento das aberturas e alteração nos tipos de elementos transparentes da envoltória.

A primeira consiste em elementos de sombreamento horizontais e verticais que foram modelados de forma a controlar a incidência solar nas janelas das fachadas leste e oeste. Nestes casos, os brises foram posicionados em todas as janelas da sala e dos quartos e as suas dimensões foram definidas para cobrir toda a extensão de onde estão posicionados, e se projetam a 0,80 metros do limite dos elementos transparentes. A escolha desta dimensão deve-se à tentativa de aproximar os ângulos de sombreamento a 30°, mantendo a mesma dimensão para todas as 3 tipologias de brise. As Figuras 6 a 8 ilustram os três casos: horizontais, verticais ou combinados. Adotou-se brises verticais e combinados orientados de maneira que barrassem a radiação solar direta do sentido Norte. As máscaras de sombreamento dos brises combinados na fachada leste da unidade habitacional estão apresentadas nas Figuras 9 e 10, considerando as cartas solares de Florianópolis e São Luís.

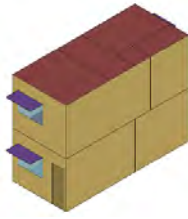


Figura 6: Ilustração dos brises horizontais analisados.

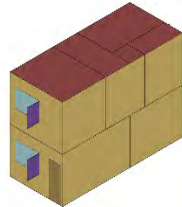


Figura 7: Ilustração dos brises verticais analisados.

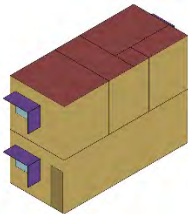


Figura 8: Ilustração dos brises combinados analisados.

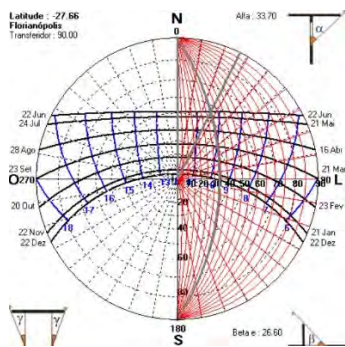


Figura 9: Máscara de sombreamento dos brises combinados na fachada leste em Florianópolis.

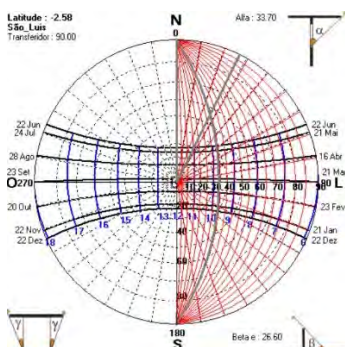


Figura 10: Máscara de sombreamento dos brises combinados na fachada leste em São Luís.

Neste viés, optou-se por avaliar mais dois casos: dois tipos de vidro, sem nenhum tipo de sombreamento, a fim de comparar os resultados de desempenho ao utilizar vidros diferentes ou adicionar sombreamento na abertura

de habitações. A Tabela 2 apresenta os dados dos dois casos de vidro simulados.

Tabela 2: Propriedades térmicas dos vidros analisados

Propriedade Térmica	Caso Vidro Laminado	Caso Vidro Duplo
Fator Solar (FS)	0,29	0,76
Transmitância Térmica ( $U_{vid}$ )	5,70 W/(m <sup>2</sup> .K)	2,70 W/(m <sup>2</sup> .K)

### Análise do desempenho térmico em relação à edificação de referência

Os casos anteriormente descritos foram avaliados por meio de simulação no software EnergyPlus 22.1. Os resultados analisados têm como base a NBR 15575:2021: carga térmica total da UH ( $CgTT_{UH}$ ), percentual de horas de ocupação da UH dentro de uma faixa de temperatura operativa (PHFT<sub>UH</sub>) e temperatura operativa máxima (Tomáx<sub>UH</sub>) e mínima (Tomín<sub>UH</sub>). Também foram analisados alguns resultados por área de permanência prolongada (APPs: sala e dormitórios). Estes resultados consideram a edificação com ventilação natural nos APPs ou o uso de condicionamento de ar artificial em horas em que a temperatura máxima permitida para ventilação não é atendida. Por fim, os resultados dos modelos com as alterações propostas foram comparados à edificação de referência, e avaliados segundo os limites da norma.

### Discussão e resultado das análises

A análise consistiu em 24 simulações (Tabela 3), considerando a edificação de referência e os cinco casos de estudo, sendo sempre uma simulação com ventilação natural e outra com condicionamento de ar artificial, totalizando duas simulações por caso.

Tabela 3: Resumo das 24 simulações realizadas

SIMULAÇÕES	Cidade			
	Florianópolis		São Luís	
Referência	VN	A/C	VN	A/C
Brise horizontal	VN	A/C	VN	A/C
Brise vertical	VN	A/C	VN	A/C
Brise combinado	VN	A/C	VN	A/C
Vidro duplo	VN	A/C	VN	A/C
Vidro laminado	VN	A/C	VN	A/C

Legenda:

VN: ventilação natural

A/C: condicionamento de ar artificial

É importante ressaltar que a carga térmica de aquecimento é inexistente em São Luís, e em Florianópolis não ultrapassa 200 kWh/ano, sendo o caso de maior  $CgTA_{UH}$  o uso do vidro laminado, com 191,08 kWh/ano, e o vidro duplo como menor resultado, com 155,97 kWh/ano (diferença inferior a 36 kWh/ano). Portanto, as análises serão realizadas pela carga térmica total da edificação para cada caso, que reflete no resultado de carga térmica de resfriamento.

A Figura 11 representa a comparação de resultados de carga térmica total entre os casos avaliados das cidades de Florianópolis e São Luís. É importante observar, portanto, que as cargas térmicas de resfriamento (ou totais) dos casos em São Luís são muito maiores do que as de Florianópolis, devido principalmente às condições climáticas ou à zona bioclimática.

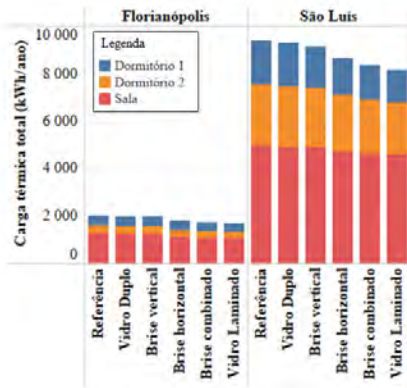


Figura 11: Resultados das análises de CgTA e CgTR.

A solução que apresentou menores resultados de carga térmica total tanto para Florianópolis quanto para São Luís foi o vidro laminado, cuja redução de CgTR<sub>UH</sub> em relação à edificação de referência foi de aproximadamente 19% para a primeira cidade, e de até 13% para a segunda. Em contrapartida, este mesmo caso também apresentou os maiores resultados para carga térmica de aquecimento de Florianópolis. Ademais, o caso com vidro duplo apresentou os maiores resultados para carga térmica total, excetuando o caso de referência (redução de 1,82% em relação à referência de Florianópolis e redução máxima de 1,2% em relação à edificação de referência de São Luís).

Entretanto, em Florianópolis, os resultados de carga térmica total dos casos de brise combinado e brise horizontal são próximos aos de vidro laminado, com diferenças inferiores a 6,3% (ou próximas a 100 kWh/ano).

Além disso, nota-se que o brise vertical não proporcionou grande redução de carga térmica nas duas cidades, em contraste com a redução encontrada pela utilização do brise horizontal.

A Figura 12 apresenta os resultados obtidos nas simulações para temperatura operativa máxima (eixo y) e temperatura operativa mínima (eixo x) para todas as variações. Observa-se que as Tomá<sub>APP</sub> e Tomín<sub>APP</sub> são sempre mais baixas nos casos com brise combinado ou vidro laminado e as temperaturas mais altas são sempre aquelas dos casos de referência.

Destaca-se também, nesta representação, a grande variação nas temperaturas operativas mínimas de Florianópolis e em São Luís. Em contrapartida, no gráfico de temperaturas operativas máximas, esta variação é muito menor. Além disso, também é interessante observar que tanto Tomá<sub>APP</sub> quanto Tomín<sub>APP</sub> variam muito pouco entre os casos simulados e a edificação de referência. Na maioria dos casos, essa variação não passa de 0,6°C.

Assim, a interferência dessas alterações de projeto, se comparadas somente as temperaturas máximas e mínimas, não são relevantes.

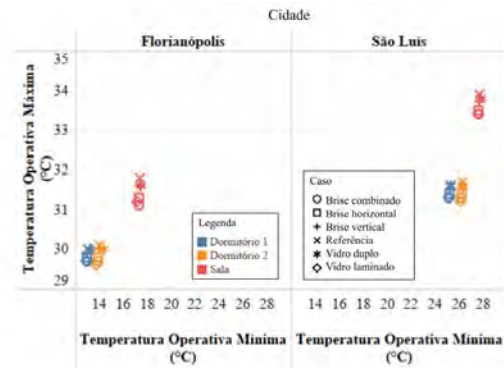


Figura 12: Resultados das análises de Tomá e Tomín.

A Figura 13 apresenta os resultados de PHFT<sub>APP</sub> para cada ambiente, em cada caso e cada cidade avaliados. Neste gráfico é possível observar que a diferença entre alguns casos por ambientes em Florianópolis é, no geral, pequena. Os brises horizontais e combinados, por exemplo, não apresentam diferença maior que 2%. Neste caso, então, a combinação do sombreamento vertical com o horizontal nem sempre é tão vantajosa, uma vez que o brise horizontal, por si só, já é bastante eficiente. Por outro lado, o brise vertical, novamente, não apresentou grande melhoria no PHFT<sub>APP</sub>. Outro ponto interessante a ser observado é que o vidro duplo, que muitas vezes aparece como solução acústica nas edificações e é mais caro que o vidro simples, não traz benefícios tão relevantes do ponto de vista térmico nas duas cidades, se comparado à referência. Na verdade, em São Luís, pode reduzir o PHFT<sub>APP</sub> de todos os ambientes. O vidro laminado, por sua vez, apesar de apresentar resultados melhores em relação aos outros casos, não promove uma diferença maior que 4% em relação às soluções de sombreamento (horizontal ou combinado) nas duas cidades. Assim, sugere-se que, para análises posteriores, o custo-benefício das soluções pode ser avaliado, tanto quanto ao custo inicial quanto ao custo de energia durante a fase de operação.

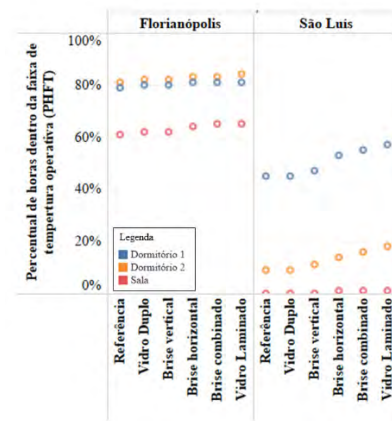


Figura 13: Resultados das análises de PHFT.

## Conclusão

O objetivo desta pesquisa foi desenvolver a análise do desempenho térmico de uma unidade habitacional de uma casa geminada, levando em consideração algumas estratégias de controle solar, como sombreamento e tipos de vidros. Considerou-se, na análise, três tipos de brises (horizontal, vertical e combinado) com vidro comum simples, e dois tipos de vidro (duplo e laminado) sem sombreamento. Além disso, considerou-se a edificação na condição de referência, cujas propriedades térmicas e geometria foram orientadas pela NBR 15575:2021. Os casos foram analisados para as cidades de Florianópolis e São Luís, que possuem clima característico bastante diferentes entre si. Os resultados da simulação consideraram os cinco parâmetros da NBR15575:2021: temperatura operativa máxima (Tomáx), temperatura operativa mínima (Tomín), carga térmica de resfriamento (CgTR), carga térmica de aquecimento (CgTA) e percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa (PHFT).

Destaca-se, nesta análise, que o caso que apresentou melhores resultados, no geral, foi o vidro laminado, seguido pelo brise combinado. Entretanto, as variações dos resultados do brise horizontal e o brise combinado não apresentam diferenças significativas nos resultados. Por outro lado, o vidro duplo, que muitas vezes é utilizado como solução acústica, não demonstrou ser muito efetivo para a melhora do desempenho térmico da edificação avaliada. Em algumas situações, este pode, ainda, reduzir o PHFT<sub>UH</sub>.

Além disso, para os casos e as cidades avaliadas neste estudo, os resultados de temperaturas operativas máximas e mínimas não apresentaram diferenças significativas.

Por fim, é importante destacar que, apesar de que alguns casos avaliados apresentaram resultados superiores aos outros, estudos futuros devem considerar o custo-benefício das estratégias. Portanto, além dos resultados aqui obtidos, indica-se que estudos futuros avaliem também o custo-benefício de soluções de melhoria de desempenho de edificações residenciais, tendo em vista que o custo inicial de tais soluções podem ser uma barreira para a execução da mesma.

## Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575-1: Desempenho de edificações residenciais: Requisitos gerais. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220:3: Desempenho de edificações: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. 2005.

Clima e condições meteorológicas médias em Florianópolis no ano todo. Weather Spark. Disponível em: <https://pt.weatherspark.com/y/30020/Clima-caracter%C3%ADstico-em-Florian%C3%B3polis-Brasil-du-rante-o-ano>. Acesso em: 16 nov. 2022.

Clima e condições meteorológicas médias em São Luís no ano todo. Weather Spark. Disponível em: <https://pt.weatherspark.com/y/30549/Clima-caracter%C3%ADstico-em-S%C3%A3o-Lu%C3%ADs-Brasil-durante-o-ano#:~:text=Em%20S%C3%A3o%20Lu%C3%ADs%20a%20esta%C3%A7%C3%A3o,superior%20a%2034%20%C2%B0C>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY and UN ENVIRONMENT PROGRAMME. 2019 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector. 2019. Disponível em: [https://iea.blob.core.windows.net/assets/3da9daf9-ef75-4a37-b3da-09224e299dc/2019\\_Global\\_Status\\_Report\\_for\\_Buildings\\_and\\_Construction.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/3da9daf9-ef75-4a37-b3da-09224e299dc/2019_Global_Status_Report_for_Buildings_and_Construction.pdf). Acesso em: 8 nov. 2022.

JORDÃO, Bárbara; A MENDES, Lorrany; PEREIRA DE SOUZA, Larissa; RAMOS, Greici; DE VECCHI, Renata; FOSSATI, Michele; MELO, Ana Paula; LAMBERTS, Roberto. Influência de parâmetros da envoltória na classificação de eficiência energética de edificações de escritório com base no novo método de avaliação simplificado do pbe edifica (ini-c). XVI ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2021.

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. NBR 15575-2021: Arquivo de simulação exemplo. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/NBR15575-2020>. Acesso em: 19 de outubro de 2022.

PEREIRA DE SOUZA, L.; COSTA, V. A. C.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. O impacto do uso de isolamento na cobertura de acordo com a NBR 15575. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 19., 2022, Canela. Porto Alegre: ANTAC, 2022.

TRIANA, Maria Andrea; LAMBERTS, Roberto; SASSI, Paola. Characterisation of representative building typologies for social housing projects in Brazil and its energy performance. Energy Policy, 2015. TRIMBLE. SketchUp Make. Disponível em: <https://www.sketchup.com/>. Acesso em 04 de agosto de 2022.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (2021). 2021 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. Nairobi: 2021. Disponível em: <https://globalabc.org/resources/publications/2021-global-status-report-buildings-and-construction>. Acesso em: 8 nov. 2022.

## The resilience of Brazilian social housing to climate change

Alexandre Santana Cruz<sup>1</sup>, Leopoldo Eurico Gonçalves Bastos<sup>1</sup>, Vítor Freitas Mendes<sup>2</sup>, Júlia Castro Mendes<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil

<sup>2</sup> Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP, Ouro Preto, Brasil

### Abstract

The objective of this study was to evaluate the Brazilian social housing resilience to climate change. This simulation-based study considered two main steps: 1) A parametric analysis was performed to evaluate and compare different constructive building systems, and 2) A multi-objective optimization of the building envelope based on the Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) was conducted to minimize the discomfort hours and cooling energy demand. The simulations using future predicted weather files were performed through EnergyPlus coupled with jEPlus and jEPlus+EA tools. The building envelope was optimized based on the building's orientation, envelope solution (wall and roof), and shading devices depth.

### Introduction

Brazil is the most populated country in Latin America, with an urban rate of approximately 85%, but more than 20% of the population lives in informality (FJP 2021). Thus, in 2009, the Federal Government introduced the MCMV program to address the housing deficit issue around the country (Brazilian Federal Government 2022). Parallel to this, according to the Brazilian Energy Expansion Plan, the electrical equipment that will consume the most energy will be the air conditioning system by the year 2029 (MME 2020). Due to climate change and the increased purchasing power of the population (including social housing users), there will be a greater air conditioning demand in residential buildings (IPCC 2001, 2007, 2010). Thus, residential buildings are of great importance given the expected increase in energy demand in the sector.

Public policies can be helpful in reducing building energy demand on a national scale (Dalbem et al. 2019; Eli et al. 2021). For instance, Brazil has a Labelling program of energy efficiency for residential buildings called RTQ-R (INMETRO 2012). The program focus on evaluated the level of energy efficiency of residential buildings. In addition, the Brazilian Labelling program includes the NBR 15220 and NBR 15575 (ABNT 2005, 2013). NBR 15220 provides calculations and measurements of material thermal properties, presents the Brazilian Bioclimatic Zones (BBZ), and indicates construction guidelines, while NBR 15575 establishes the minimum thermal performance standards to be met according to each BBZ (ABNT 2005, 2013).

To effectively understand buildings' thermal-energy performance, designers rely on computer energy simulations to support the building design (Lamberts, Dutra, and Pereira 2014). In this context, designers usually perform a parametric analysis that changes one design variable while the others are kept constants (Solgi et al. 2019; Yao et al. 2018). However, this approach is reduced to one objective function. Furthermore, many genetic algorithms (GA) emerged as alternative methods to solve multi-objective problems. For example, decreasing the air-conditioning energy demand should not sacrifice the thermal comfort. The multi-objective optimization based on GA consists of a fast and intuitive choosing procedure that is based on natural selection theory (Deb 2011; Kämpf and Robinson 2009; Machairas, Tsangrassoulis, and Axarli 2014).

Therefore, the objective of this study was to evaluate the Brazilian social housing resilience to climate change. This simulation-based study considered two main steps: 1) A parametric analysis was performed to evaluate and compare different constructive building systems, and 2) A multi-objective optimization of the building envelope based on the Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) was conducted to minimize the discomfort hours and cooling energy demand. The simulations using future predicted weather files were performed through EnergyPlus coupled with jEPlus and jEPlus+EA tools. The building envelope was optimized based on the building's orientation, envelope solution (wall and roof), and shading devices depth.

### Method

A social housing model from the Brazilian MCMV national program located in the city of Rio de Janeiro – Brazil was used as a case study. The method considered for this simulation-based study was divided into three main steps. In the first step, a parametric analysis was performed to evaluate and compare the Brazilian social housing resilience to climate change based on different constructive building systems. At this stage, the objective was to identify the discomfort hours and cooling energy demand for each envelope solution combination for the current and future weather files. For the second step, a multi-objective optimization of the building envelope based on the NSGA-II was conducted to minimize the discomfort hours and cooling energy demand. The building envelope was optimized based on the wall and roof type, orientation, and shading devices depth

(Overhang and side fin) for the current and future weather files. Finally, in the third step, the optimized models were compared with the envelope solutions previously analyzed in this study.

**Case study**

A single-family house unit with a total net area of 43 m<sup>2</sup> was considered as a case study. This representative project followed the guidelines from the MCMV national program and was presented in a previous study (Cruz and Cunha 2021). The one-story house comprises a living room with a kitchen, two bedrooms, one bathroom, 3m ceiling height, facing north-south, and fenestration areas of 5.96 m<sup>2</sup> (20% window-to-wall ratio). Figure 1 illustrated the single-family house floor plan and section.

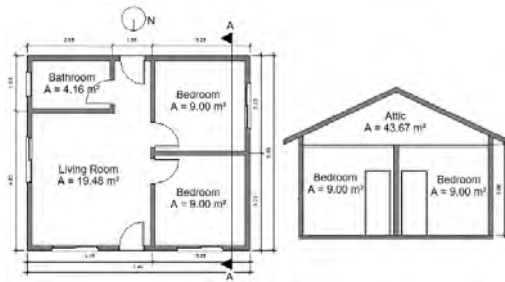


Figure 1. Case study floor plan and section.

The energy model was created in EnergyPlus and followed the standard simulation values from the Brazilian Labelling program as a calibration strategy (INMETRO 2012). A total of five thermal zones were created: living room (LR), bedroom 1-2 (BR), bathroom, and the attic. The occupancy of two people per BR and four people in the LR was adopted and the lighting schedule varied as indicated in Figures 2 and 3, respectively. The metabolic rate and lighting power density for the LR and BR were equal to 108W/person and 5W/m<sup>2</sup>, and 81W/person and 6W/m<sup>2</sup>, respectively. In addition, an equipment load of 1.5 W/m<sup>2</sup> for the LR was considered during 24h.

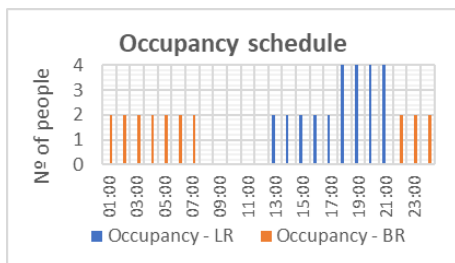


Figure 2. Occupancy schedule.

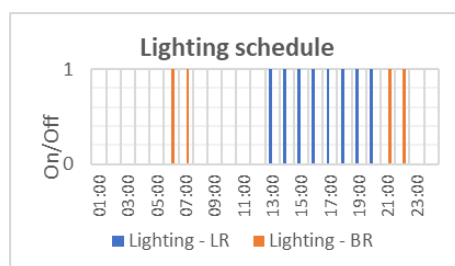


Figure 3. Lighting schedule.

The energy model was configured for two operation modes: naturally ventilated model and with an air-conditioning system in the LR/BR. For the first operation mode, the natural ventilation was modelling using the Airflow network object in EnergyPlus defined as happening during the occupancy schedule. In this context, the window opening occurs when the indoor air temperature is equal to or greater than the thermostat setpoint and when the indoor air temperature is higher than the outdoor temperature. In addition, the thermal comfort indicator considered for this study was based on the 90% acceptability limits of the ASHRAE Adaptive Comfort model (ASHRAE 2010). For the second operation mode, the air-conditioning system was used modelled using the PTHP object in EnergyPlus to predict the cooling energy demand. The air-conditioning system was configured with a setpoint of 20 °C for heating and 25 °C for cooling and a Coefficient of Performance (COP) equals to 3.00 (INMETRO 2012).

**Constructive building systems**

To evaluate the Brazilian social housing resilience to climate change, different constructive building systems were considered by varying the composition of the roof and wall. The compositions adopted are popular constructive building systems that seek to meet the Brazilian Energy Labelling program requirements, as well as compositions with thermal insulation that are still little used in this country (Dalbem et al. 2019; Eli et al. 2021). Thermal insulation can reduce heat exchange with the outdoor environment, acting as a passive design strategy to reduce air-conditioning energy demand. But it can also promote overheating in tropical regions unless other passive design strategies are adopted to improve thermal comfort inside the building (Cruz et al. 2020). The constructive building systems considered in this study with their respective ID, thermal transmittance and capacity, solar factor, and solar absorptance are presented in Table 1. The thermal transmittance and capacity were calculated according to the NBR 15220 (ABNT 2005).

Table 1. Constructive building systems (ABNT 2005).

Element	ID	Description
Wall	W1	Cement plaster + hollow clay brick. U = 2.30, TC = 167, SA = 0.2
	W2	Cement plaster + concrete U = 4.40, TC = 240, SA = 0.2
	W3	Cement plaster + glass wool + plasterboard. U = 0.50, TC = 38, SA = 0.2
Roof	R1	Fiber-cement tile + air gap + concrete U = 2.00, TC = 32, SA = 0.2
	R2	Ceramic cement tile + air gap + wood lining U = 2.04, TC = 246, SA = 0.6
	R3	Fiber-cement tile + air gap + glass wool + plasterboard U = 0.38, TC = 278, SA = 0.2
Floor	-	Concrete slab + ceramic tile U = 3.40, TC = 278, SA = 0.2
Window	-	Simple glass. U = 5.87, SF = 0.86

Note: U – thermal transmittance ( $W/m^2K$ ), TC – Thermal capacity ( $kJ/m^2K$ ), SF – Solar factor (%), and SA – solar absorptance.

### Weather data

The city of Rio de Janeiro is located in the BBZ 8 that is considered the hottest zone in the country (ABNT 2005). In addition, to address the climate change, this studied used a future weather file based on the IPCC high emission scenario report (HadCM3 A2 - SRES) (IPCC – 2001, 2007, 2010). Table 2 illustrated the annual average climate parameters (DBT – Dry-bulb temperature, RH – Relative humidity, and GHR – Global horizontal radiation) for the Rio de Janeiro presented in the current and future weather files.

Table 2. Climate parameters of Rio de Janeiro

BBZ 8	DBT (°C)			RH (%)	GHR (Wh/m <sup>2</sup> )
	Average	Max	Min		
Current	24	28	21	82	211
Future	27	30	23	91	221

### Simulation approaches

This study had two main simulation approaches. First, a parametric analysis was performed to evaluate and compare the Brazilian social housing resilience to climate change based on different constructive building systems. Second, a multi-objective optimization of the building envelope based on the NSGA-II was conducted to minimize the discomfort hours and cooling energy demand. The description and details of each approach are presented as follows.

As mentioned, the parametric analysis varies one parameter at a time while the others are kept constant (Solgi et al. 2019; Yao et al. 2018). At this stage, the objective was to identify the discomfort hours and cooling energy demand for each envelope combination for the current and future weather files. Table 3 illustrated the parameters considered for this stage.

Table 3. Parametric analysis variables

ID	Design variable	Sampling
p0	Wall type	W1-3
p1	Roof type	R1-3

A multi-objective optimization based on a GA is focused on the efficiency of resources for a given problem. In general, GA begins creating a random population based on the design variable ranges. Afterwards, GA evaluates the initial population using a fitness function and ranks the solutions based on non-dominated sorting. Subsequently, the algorithm creates the next generation through crossovers and mutations and applies elitism to the best individuals of the parent's chromosome. Individuals with a higher rank position and a larger crowding distance are selected as the new parents for crossovers and mutation to generate new generations. This process can be interrupted if the solutions found are sufficient or continues until the termination criteria are met (Deb 2011; Kämpf and Robinson 2009; Machairas, Tsangrassoulis, and Axarli 2014). For this step, two

conflicting objectives were involved, the optimization process was conducted to minimize the discomfort hours and cooling energy demand. In this study, the NSGA-II algorithm was used due to its popularity in building performance optimization studies (Deb 2011; Kämpf and Robinson 2009; Machairas, Tsangrassoulis, and Axarli 2014). The algorithm was configured with population size, crossover and mutation rates, tournament size and generations equal to 50, 1, 0.2, 2 and 100, respectively (Linczuk and Bastos 2020). The building envelope was optimized for the current and future weather files based on the wall and roof type, orientation, and shading devices depth (Overhang and side fin). Table 4 presented the ID and sampling ranges for the design variables considered in the optimization.

Table 4. Design variables for the optimization

ID	Design variable	Sampling ranges
p0	Wall type	W1-3
p1	Roof type	R1-3
p2	Orientation (°)	[0:360:45]
p3	Overhang - shading device depth (m)	[0:0.6:0.1]
p4	Side fin - shading device depth (m)	[0:0.6:0.1]

## Results

### Parametric analysis results

Following the method, the results for the parametric analysis were assessed. Figures 4 and 5 illustrated the thermal and energy performance of the case study with nine different envelope combinations for current and future weather files, respectively. For Figure 4, the metric evaluated was the occupied discomfort hours (h) for the whole year based on the 90% acceptability limits of the ASHRAE Adaptive Comfort model. For Figure 5, the metric evaluated was the cooling energy demand for the whole year (kWh/y).

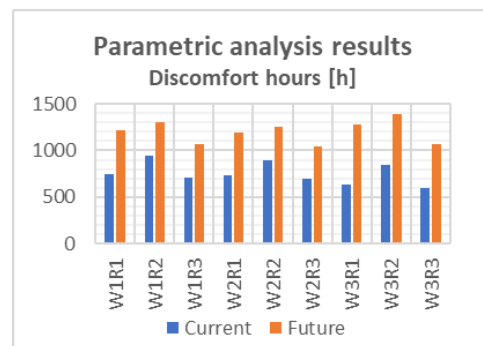


Figure 4. Parametric analysis results for discomfort hours

Regarding thermal performance, when considering the future climate file, the discomfort hours increased between 40% and 100%. The most and the least resilient models to climate change were the W1R2 and the W3R1 models, respectively. Model W3R3 had the best performance for the current weather file due to thermal insulation that reduces heat exchange with the outdoor



environment. The W3R3 model was able to reduce discomfort hours by 60% when compared to the worst case (W1R2). On the other hand, the W2R3 model had the best performance for the future weather file. The W2R3 model was able to reduce the discomfort hours by 34% when compared to the worst case (W3R2).

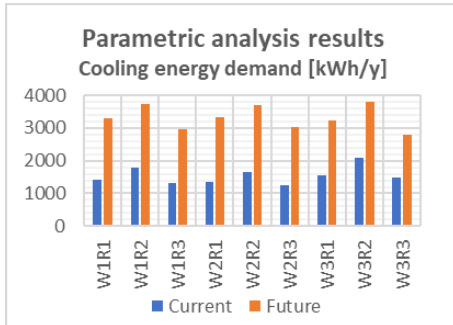


Figure 5. Parametric analysis results for cooling energy demand

Regarding energy performance, when considering the future climate file, the cooling energy demand increased between 83% and 146%. The most and the least resilient models to climate change were the W3R2 and the W2R1 models, respectively. Model W2R3 had the best performance for the current weather file. The W2R3 model was able to reduce cooling energy demand by 66% when compared to the worst case (W3R2). On the other hand, the W3R3 model had the best performance for the future weather file. The W3R3 model was able to reduce the cooling energy demand by 34% when compared to the worst case (W3R2). These results confirm that thermal insulation must be combined with other passive design strategies to prevent overheating inside the building.

**Multi-objective optimization results**

Afterwards, a multi-objective optimization of the building envelope based on the NSGA-II was conducted to minimize the discomfort hours and cooling energy demand. The building envelope was optimized based on the wall and roof type, orientation, and shading devices depth. The multi-objective optimization provides a series of optimal solutions called Pareto front. Therefore, Figures 6 and 7 illustrated the optimizations results for the current and future weather files, respectively.

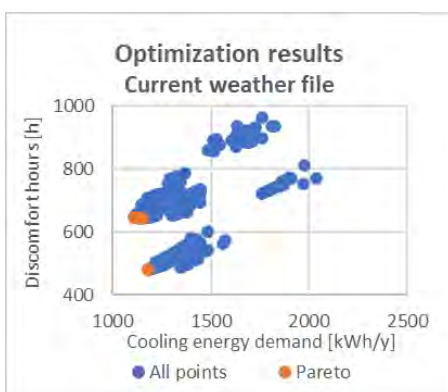


Figure 6. Optimization results for the current weather file.

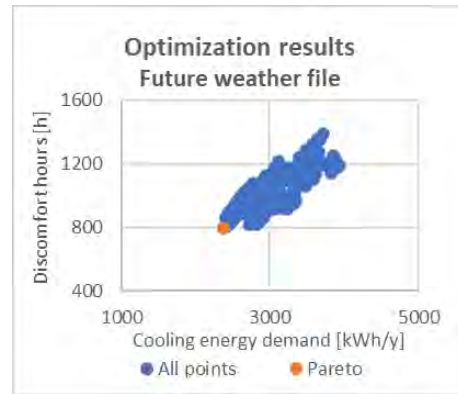


Figure 7. Optimization results for the future weather file.

Each point on the graph represents a combination of design variables. At first, when comparing both Figures, it was possible to conclude that users will consume more energy and suffer more discomfort hours in the future due to climate change. For the optimization using the current weather file, the Pareto front was composed of six solutions, as for the future, this number was reduced to one solution as indicated in Table 5, respectively.

Table 5. Pareto front configuration

ID	Current						Future
	OP	2°	3°	4°	5°	6°	OP
p0	W2	W1	W1	W2	W2	W3	W3
p1	R3	R3	R3	R3	R3	R3	R3
p2	0.6	0.5	0.6	0.5	0.6	0.6	0.6
p3	0.6	0.5	0.6	0.3	0.3	0.6	0.6
p4	180	180	180	180	180	180	225

By analyzing the Pareto front for the current weather file, it was possible to conclude that the main difference between the solutions was the wall type. The orientation and roof type were exactly the same, and there was a slight variation in the shading devices depth between the solution cases. In the Pareto front for the future weather file, the wall and roof type with thermal insulation combined with the largest shading devices depth was the preferred solution. The strategy used to identify the best Pareto front alternative was the lowest absolute value of the difference between discomfort hours and cooling energy demand. Thus, Table 5 indicated the two optimized models (for the current and future weather file) defined through the 'OP' code.

**Comparative analysis**

Finally, the optimized models were compared with the constructive building systems previously analyzed in this study. Figure 8 plotted the thermal-energy performance of the optimized models and the nine cases evaluated in the parametric analysis step.

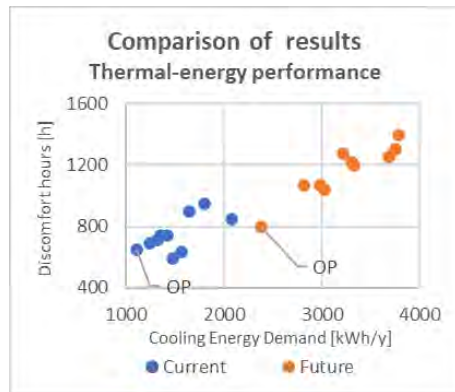


Figure 8. Comparison of the results for the current and future weather file.

For the current weather file, the optimized model could reduce cooling energy demand by 86% and discomfort hours by 47% when compared to the worst case for each operation mode - the W3R2 and W1R2 models, respectively. Furthermore, to reduce the cooling energy demand, the optimized model penalized the discomfort hours, which is why there are two other models (W3R3 and W3R1) that reported better thermal performance than the optimized model. For the future weather file, the optimized model could reduce cooling energy demand by 59% and discomfort hours by 75% when compared to the worst case (W3R2). Therefore, applying thermal insulation on the roof, adopting shading devices for windows, and the building's orientation proved to be essential factors in promoting thermal-energy performance resilience to the built environment. These results showed that the thermal-energy performance evaluation of constructive building systems is essential to promote resilience to the built environment, especially in social housing projects.

## Conclusion

Due to climate change and the increased purchasing power of the population, there will be a greater air conditioning demand in residential buildings. Thus, the objective of this study was to evaluate the Brazilian social housing resilience to climate change.

At the first step, a parametric analysis was performed to evaluate and compare the Brazilian social housing resilience to climate change based on different constructive building systems. The compositions adopted are popular constructive building systems that seek to meet the Brazilian Energy Labelling program requirements, as well as compositions with thermal insulation that are still little used in this country. For the performance results, when considering the future weather file, the discomfort hours and cooling energy demand increased up to 100% and 146%, respectively. In addition, the envelope combination with the best performance varied according to the building's operating mode. For the current and future weather files, the W3R3 and W2R3 models were able to reduce discomfort hours by 60% and 34% when compared to the worst cases (W1R2/W3R2), while W2R3 and W3R3 models were able to reduce

cooling energy demand by 66% and 34% when compared to the worst case (W3R2), respectively. These results confirmed that thermal insulation must be combined with other passive design strategies to prevent overheating inside the building.

At the second step, a multi-objective optimization of the building envelope based on the NSGA-II was conducted to minimize the discomfort hours and cooling energy demand. When analyzing the Pareto front for the current weather file, it was possible to conclude that the main difference between the solutions was the wall type. The orientation and roof type were exactly the same, and there was a slight variation in the shading devices depth between the solution cases. In the Pareto front for the future weather file, the wall and roof type with thermal insulation combined with the largest shading devices depth was the preferred solution. Finally, in the third step, the optimized models were compared with the envelope solutions previously analyzed in this study. The strategy used to identify the best Pareto front alternative was the lowest absolute value of the difference between discomfort hours and cooling energy demand. For the current weather file, the optimized model could reduce cooling energy demand by 86% and discomfort hours by 47% when compared to the worst case for each operation mode - the W3R2 and W1R2 models, respectively. For the future weather file, the optimized model could reduce cooling energy demand by 59% and discomfort hours by 75% when compared to the worst case (W3R2). Therefore, applying thermal insulation on the roof, adopting shading devices for windows, and the building's orientation proved to be essential factors in promoting thermal comfort and energy efficiency in social housing. These results showed that the thermal-energy performance evaluation of constructive building systems is essential to promote resilience to the built environment.

## Acknowledgement

The authors would like to thank the Higher Education Improvement Coordination (CAPES), Master Scholarship. This study was carried out with the support of the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel - Brazil (CAPES) - Financing Code 001.

## References

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2005. *NBR 15220: O Desempenho Térmico Para Edificações de Interesse Social*.
- . 2013. *NBR 15575 NBR 15575: A Norma Brasileira de Desempenho de Edifícios Habitacionais*. Rio de Janeiro.
- ASHRAE. 2010. *ASHRAE STANDARD - Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. ANSI/ASHRAE Standard 55-2010 - Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Atlanta, GA. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0140700779901142>.

- Brazilian Federal Government. 2022. “Programa MCMV - Minha Casa, Minha Vida No Brasil.” <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/habitacao/minha-casa-minha-vida/programa-minha-casa-minha-vida-mcmv> (October 21, 2022).
- Cruz, Alexandre S., Ramon S. de Carvalho, and Eduardo G. da Cunha. 2020. “Passive House Alternative Proposal for the Brazilian Bioclimatic Zone 8.” *International Journal of Sustainable Development and Planning* 15(6): 827–33.
- Cruz, Alexandre Santana, and Eduardo Grala da Cunha. 2021. “The Impact of Climate Change on the Thermal-Energy Performance of the SCIP and ICF Wall Systems for Social Housing in Brazil.” *Indoor and Built Environment* 0(0): 1–15.
- Dalbem, Renata et al. 2019. “Optimisation of a Social Housing for South of Brazil: From Basic Performance Standard to Passive House Concept.” *Energy* 167: 1278–96.
- Deb, Kalyanmoy. 2011. “Multi-Objective Optimisation Using Evolutionary Algorithms: An Introduction.” In *Multi-Objective Evolutionary Optimisation for Product Design and Manufacturing*, London: Springer London, 3–34. [http://link.springer.com/10.1007/978-0-85729-652-8\\_1](http://link.springer.com/10.1007/978-0-85729-652-8_1).
- Eli, L. G. et al. 2021. “Thermal Performance of Residential Building with Mixed-Mode and Passive Cooling Strategies: The Brazilian Context.” *Energy and Buildings* 244: 111047. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111047>.
- FJP, Fundação João Pinheiro. 2021. “Deficit Habitacional E Inadequação De Moradias No Brasil: Principais Resultados Parao Período de 2016 a 2019.” : 71. [http://novosite.fjp.mg.gov.br/wp-content/uploads/2020/12/04.03\\_Cartilha\\_DH\\_compressed.pdf](http://novosite.fjp.mg.gov.br/wp-content/uploads/2020/12/04.03_Cartilha_DH_compressed.pdf).
- INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia. 2012. *RTQ-R O Regulamento Técnico Da Qualidade Para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais -RTQ-R*. <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001788.pdf>.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. 2001. *Third Assessment Report of the IPCC. III AR*. Geneva – Switzerland.
- . 2007. Intergovernmental Panel on Climate Change. *Fourth Assessment Report of the IPCC. IV AR*. Geneva – Switzerland.
- . 2010. Update on Scenario Development: from SRES to RCPs *Fifth Assessment Report of the IPCC. VAR*. Geneva – Switzerland.
- Kämpf, Jérôme Henri, and Darren Robinson. 2009. “A Hybrid CMA-ES and HDE Optimisation Algorithm with Application to Solar Energy Potential.” *Applied Soft Computing Journal* 9(2): 738–45.
- Lamberts, Roberto, Luciano Dutra, and Fernando O. R. Pereira. 2014. *Eficiência Energética Na Arquitetura*. 3ª. Rio de Janeiro: Eletrobras.
- Linczuk, Vinicius Cesar Cadena, and Leopoldo Eurico Gonçalves Bastos. 2020. “Otimização Multiobjetivo Orientada Ao Desempenho Térmico Para o Projeto de Edificações de Baixo Consumo de Energia Na Região Sul Do Brasil.” *Ambiente Construído* 20(4): 509–29.
- Machairas, Vasileios, Aris Tsangrassoulis, and Kleo Axarli. 2014. “Algorithms for Optimization of Building Design: A Review.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 31(1364): 101–12.
- MME, Ministry of Mines and Energy. 2020. *Empresa de Pesquisa Energética Ten Year Energy Expansion Plan - 2029*. Rio de Janeiro. <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE2029.pdf>.
- Solgi, Ebrahim, Zahra Hamedani, Ruwan Fernando, and Behrouz Mohammad Kari. 2019. “A Parametric Study of Phase Change Material Characteristics When Coupled with Thermal Insulation for Different Australian Climatic Zones.” *Building and Environment* 163(June): 106317. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106317>.
- U.S. Department of Energy. 2019. *EnergyPlus - Input Output Reference*. [https://energyplus.net/assets/nrel\\_custom/pdfs/pdfs\\_v9.6.0/InputOutputReference.pdf](https://energyplus.net/assets/nrel_custom/pdfs/pdfs_v9.6.0/InputOutputReference.pdf) (November 11, 2022).
- UNEP; WMO. 2000. *IPCC IPCC SPECIAL REPORT — Emissions Scenarios*.
- Yao, Runming et al. 2018. “The Effect of Passive Measures on Thermal Comfort and Energy Conservation. A Case Study of the Hot Summer and Cold Winter Climate in the Yangtze River Region.” *Journal of Building Engineering* 15(November 2017): 298–310. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2017.11.012>.

## Aporte metodológico al cálculo de la influencia del cambio climático en las estrategias pasivas de edificios

Gustavo J. Barea Paci<sup>1</sup>, Carolina Ganem Karlem<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE). Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) Mendoza, Argentina  
gbarea@mendoza-conicet.gob.ar – cganem@mendoza-conicet.gob.ar

### Resumen

*Se presenta una metodología que permite la cuantificación del cambio relativo en la efectividad de las estrategias de diseño pasivas, calculadas para el clima actual, respecto a las proyecciones de clima futuro del IPCC (The Intergovernmental Panel on Climate Change). Se trabaja con el escenario RCP8.5 del CMIP5, equivalente a un escenario SSP85 del CMIP6. Para el caso de Mendoza (Argentina), las temperaturas medias anuales podrían incrementarse en 5°C para el 2100, con aumentos de 7°C en las medias mensuales de verano y de 4.4°C en las medias mensuales de invierno. Los resultados muestran una disminución del 20% en la cantidad de horas en confort con un incremento del 24% en la necesidad de estrategias pasivas de verano.*

### Introducción y Objetivo

A lo largo de los últimos años se han acumulado evidencias del C.C. (Cambio Climático) y de sus impactos sobre distintos sectores socioeconómicos y sistemas naturales en todas las regiones del planeta.

Las proyecciones futuras del clima indican que, aunque los esfuerzos mundiales para reducir las emisiones resulten eficaces, los efectos del cambio climático se harán sentir durante décadas.

Diversos fenómenos extremos asociados a las condiciones climáticas, como olas de calor, sequías, lluvias torrenciales o incendios, que causan serios impactos sociales y ambientales aumentarán su frecuencia y su intensidad.

Por esta razón, la adaptación al cambio climático es una estrategia necesaria a todas las escalas (territorio, ciudad, edificio). Prioritaria para complementar los esfuerzos de reducción de las emisiones que lo provocan y reducir su impacto creciente sobre la economía y la sociedad.

Según la Agencia Internacional de Energía, la intensidad energética por metro cuadrado del sector de la construcción debería reducirse en un 30% hacia el 2030, para cumplir los objetivos climáticos del acuerdo de París. (UN, 2016)

Esto requerirá casi duplicar el rendimiento energético actual de los edificios y significa que los edificios de consumo de energía casi nulo (nZEB) necesitan convertirse en el standard global en la próxima década. Al mismo tiempo, surge una clara necesidad de invertir en la renovación energética de los edificios existentes.

Tomando en consideración que la tasa de renovación anual edilicia se encuentra en el orden del 2% en promedio para la Unión Europea, siendo del orden del 0,2% anual en países como España (El País, 2020); los edificios existentes serán los responsables de gran cantidad de emisiones polucionantes en nuestras ciudades.

Consecuentemente, la identificación y aplicación de metodologías para disminuir las demandas de energía de los edificios es fundamental dados los desafíos energéticos globales, así como las consecuencias inminentes del cambio climático.

Elias (2017); Brager & de Dear (1998) han sugerido que para diseñar los edificios y optimizar su confort térmico en los próximos años sin cargar el ecosistema con una mayor degradación ambiental, se deben conocer las predicciones sobre las condiciones climáticas futuras en diferentes ciudades. De este modo, se puede anticipar cualquier cambio y contrarrestar sus efectos mediante la eficiencia energética, un mejor diseño y, en última instancia, el ahorro de energía (Li, et al, 2012).

En Argentina, el Centro de Investigaciones Marinas y Atmosféricas (CIMA) elaboró un informe sobre las tendencias climáticas (segunda mitad del siglo XX) y una proyección del clima futuro (siglo XXI) como parte de los estudios de referencia para la tercera Comunicación Nacional a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (3CN Cima, 2022). El estudio se centra en las tendencias observadas y proyectadas de la temperatura y las precipitaciones en superficie y en algunos de los índices extremos que pueden causar impactos relevantes.

Los escenarios climáticos del siglo XXI se calcularon para dos horizontes temporales diferentes: el clima futuro cercano (2015-2039), de interés para las políticas de adaptación, y el clima futuro lejano (2075-2099), para informar el escenario a largo plazo. Los periodos exactos se eligieron en función de los resultados de los modelos de circulación global (MCG) y los modelos climáticos regionales (MCR) disponibles. Los escenarios climáticos se desarrollaron para dos RCPs (Representative Concentration Pathway), 4,5 y 8,5 (coincidentes con los escenarios SSP2-4.5 Y SSP5-8.5 del CMIP6, ver figura 2). Se trata de un escenario de crecimiento medio (RCP 4,5) y el caso extremo (RCP 8,5) en el que las emisiones seguirán creciendo según las tendencias actuales hasta el final del siglo.

Ante esta situación, y considerando que la matriz energética de Argentina está basada en un 90% en combustibles fósiles y que el parque edilicio representa el 40% del consumo energético nacional, es fundamental reconocer que los edificios juegan un papel crítico en un futuro bajo en emisiones y como tal su integración con el desarrollo sostenible representa un desafío global (Flores Larsen et al., 2019; Flores Larsen & Filippín, 2021; Barea 2022).

En función de lo expresado, el objetivo principal del estudio es realizar un aporte metodológico al cálculo de la influencia del cambio climático en las estrategias pasivas de edificios que posibilite la cuantificación del cambio relativo en la efectividad de las medidas de diseño (pasivas) analizadas, con respecto al uso general de energía para calefacción y refrigeración en edificios naturalmente ventilados y protegidos de la radiación solar.

Esto permitirá identificar qué medidas de diseño ganarán o perderán importancia debido al calentamiento climático y la correlación entre la eficacia de los sistemas pasivos analizados.

Los resultados del análisis serán directamente aplicables a los diseñadores de edificios, ya que se clasificarán las medidas de diseño que ganarán o perderán importancia debido al calentamiento climático y la magnitud relativa a este cambio. Así también, este trabajo intenta aportar al desarrollo de metodologías para la elaboración de archivos de cambio climático para la simulación dinámica de edificios.

**Metodología**

En una primera instancia, se analizó el potencial bioclimático de un clima templado continental de la Argentina (Mendoza, latitud sur -33° 9', longitud oeste 69° 15'), mediante la herramienta BcChart (M. Kosir, et al 2018).

El análisis del potencial bioclimático correlaciona las características climáticas esenciales, como la temperatura del aire, la humedad relativa y la radiación solar, con la capacidad de lograr el confort de los ocupantes del edificio a través de los sistemas solares pasivos de edificios. Este estudio permite representar a través del potencial pasivo, la adaptación climática de los edificios para el clima estudiado. Los cálculos se basan en la teoría de gráficos bioclimáticos de Olgay, utilizando la temperatura del aire, la humedad relativa (RH) y la radiación solar global. La zona de confort se define entre 21 y 27 °C y entre 20 y 80 % RH.

Las combinaciones de las variables climáticas definen si se pueden usar ciertas soluciones pasivas para lograr el confort térmico, o si se necesitan sistemas activos (refrigeración mecánica, calefacción convencional) (M. Kosir, et al 2017). El programa utiliza archivos climáticos EPW, del tipo TMYx, que se obtuvieron de <https://climate.onebuilding.org/>, para la localidad estudiada.

En la Fig. 1 se presentan las definiciones de cada potencial bioclimático determinado por BcChart. La figura también ilustra la relación entre las medidas de diseño pasivo analizadas y el potencial bioclimático del lugar.

La relación entre el potencial bioclimático y las medidas de diseño pasivo analizadas, está indicado siempre que se pueda utilizar una determinada medida de diseño para facilitar una mejor respuesta térmica pasiva de un edificio y, en consecuencia, una mayor eficiencia energética.

Posteriormente se analiza como el potencial bioclimático del clima estudiado para el presente se modificará a hacia el año 2100. Para ello se utilizaron datos de escenario climáticos futuros del IPCC. El Quinto Informe de Evaluación del IPCC ha definido cuatro nuevos escenarios de emisiones; las denominadas Vías de Concentración Representativas (RCP), que tienen en cuenta los efectos de las políticas del siglo XX en la mitigación del cambio climático, a diferencia de los escenarios del Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), 2007 (AR4), denominados SRES, que no tenían en cuenta los efectos de las políticas viables o los acuerdos internacionales en la mitigación de las emisiones. Los cuatro RCP no sólo abarcan una amplia gama de escenarios futuros de calentamiento global, sino que también cuantifican las concentraciones futuras de gases de efecto invernadero y el forzamiento radiativo (energía adicional absorbida por el sistema terrestre) debido al aumento de la contaminación por el cambio climático.

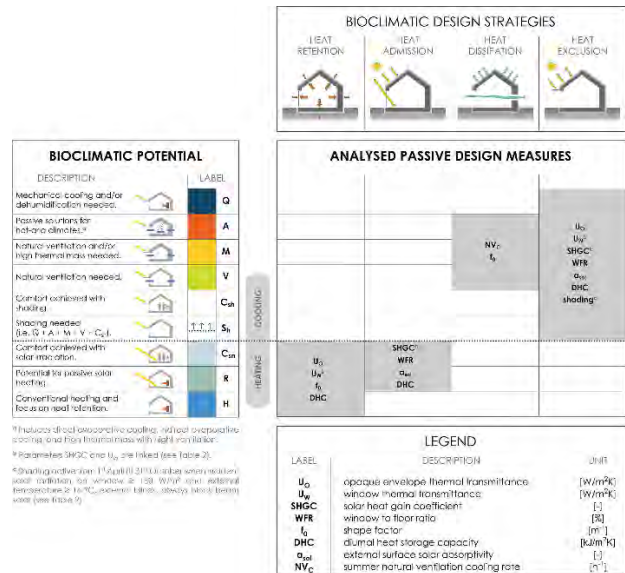


Figure 1: Medidas de potencial bioclimático calculadas por BcChart y medidas de diseño pasivo analizadas correspondientes (M. Kosir, et al 2017; Košir 2019)

El forzamiento radiativo (FR) total previsto para el año 2100 oscila entre 2,6 y 8,5 W/m2. Los cuatro RCP comprenden un escenario en el que los esfuerzos de mitigación conducen a un nivel muy bajo de forzamiento (RCP 2,6), dos escenarios de estabilización (RCP 4,5 y RCP 6,0) y un escenario (RCP 8,5) con un nivel muy alto de emisiones de GEI (gases de efecto invernadero). Es importante señalar que, hasta mediados del siglo XXI, las

diferencias en los resultados entre los RCP son muy pequeñas, debido a que el sistema climático responde con relativa lentitud a los cambios en la concentración de GEI. Por ello, se ha tomado el escenario RCP 8.5 para los análisis posteriores, ya que proporciona un calentamiento mucho más rápido y cambios más pronunciados en indicadores importantes como el caudal de los ríos, la temperatura y las precipitaciones.

El sexto informe de evaluación del IPCC (AR6), se ha alimentado con el desarrollado de un nuevo conjunto de escenarios, SSP, a través del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados 6 (CMIP6) del Programa Mundial de Investigación del Clima (WCRP), que actualiza los RCP del CMIP5. Los nuevos escenarios representan diferentes desarrollos socioeconómicos, así como diferentes vías de concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera.

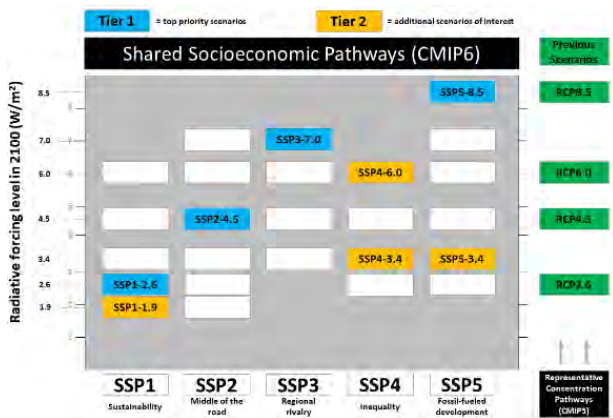


Figura 2: Vías socioeconómicas compartidas y combinaciones de forzamiento radiativo del año 2100 utilizadas en ScenariMIP (O'Neill et al., 2016)

La Figura 2 muestra una matriz que representa todas las combinaciones posibles de SSP y forzamiento radiativo (RCP), codificadas por colores para mostrar la prioridad de cada escenario. Los escenarios de nivel 1, o prioridad máxima, son SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5 (color azul). Tres de los cuatro escenarios de Nivel 1 son versiones actualizadas de escenarios RCP de CMIP5 anteriores (RCP2.6, RCP4.5 y RCP8.5) para facilitar la comparación entre las proyecciones de CMIP5 y CMIP6. Los escenarios de nivel 2 son SSP1-1.9, SSP4-6.0, SSP4-3.4 y SSP3-3.4 (color naranja). Todas las demás combinaciones de forzamiento radiativo y SSP no son viables o no están designadas como una prioridad por ScenariMIP (O'Neill et al., 2016).

Como se observa en la figura 2, el escenario RCP8.5 del CMIP5 utilizado en este trabajo, equivale a un escenario SSP85 del CMIP6, con una prioridad 1.

La metodología utilizada para generar los datos futuros horarios se conoce como morphing (Jensteh et al., 2008), un método que utiliza tanto un archivo meteorológico en

tiempo real como predicciones de datos medios mensuales futuros de la variable de interés.

Mediante transformaciones matemáticas de "desplazamiento" y "estiramiento" basadas en las medias mensuales presentes y futuras de las variables, un archivo meteorológico en tiempo presente se transforma en un archivo meteorológico futuro. La naturaleza de las transformaciones garantiza que la relación entre las variables meteorológicas se mantenga en el archivo meteorológico futuro. En este artículo, los datos horarios de tiempo presente fueron los del Año Meteorológico Típico (TMYx) basados en las medias del periodo 2007-2021.

Para las predicciones futuras, se ajustó el modelo ACCESS 1-3 RCP8.5<sup>1</sup>, r1i1p1 (con una grilla de 1.875 por 1.25 grados), con datos observacionales de reanálisis CRU TS4.05 para corroborar la bondad de predicción en el área de estudio. Se tomaron datos desde 1901 hasta 2021. Para la cuantificación de la concordancia entre los datos de reanálisis y el modelo futuro, se utilizaron los siguientes indicadores estadísticos ampliamente utilizados: d, MAE, RMSE y BIAS, calculados (Tabla 1) utilizando las siguientes ecuaciones:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (obs_i - sim_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|sim_i - obs_i| + |obs_i - obs_i|)^2} \quad (1)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |sim_i - obs_i| \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (sim_i - obs_i)^2} \quad (3)$$

$$BIAS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (sim_i - obs_i) \quad (4)$$

Donde:

- d = Concordancia o índice de Willmott
- MAE = Error medio absoluto
- RMSE = Error cuadrático medio.
- BIAS = Error medio
- sim<sub>i</sub> = Datos del modelo futuro
- obs<sub>i</sub> = Datos de reanálisis medidos
- obs = Datos medios de reanálisis medidos
- n = Tamaño de la muestra

Luego se analizaron anomalías por períodos de 50 años, hasta el 2100 y se armaron los EPW futuros. Los datos se descargaron del sitio Climate Explorer del KNMI (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut).

## Discusión y Análisis de Resultados

Los resultados del estudio se presentan en dos secciones. La primera parte presenta el análisis bioclimático de la localidad estudiada (Mendoza) con el clima actual, TMY. Posteriormente se muestra la influencia del CC en las estrategias bioclimáticas.

<sup>1</sup> KNMI Climate Explorer and CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australia), and BOM (Bureau of Meteorology, Australia).

**Potencial Bioclimático con Clima Actual**

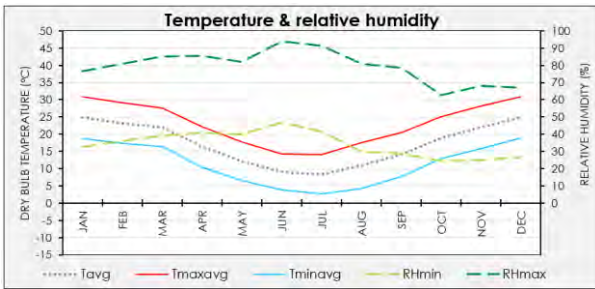


Figura 4: Temperaturas y Humedad relativas de Mendoza  
Mendoza tiene un clima desértico frío templado continental con importantes variaciones diarias y anuales. Según la clasificación de Koeppen (Kottek et al, 2006), es un clima Bwk. La figura 4 muestra las temperaturas máxima, mínima y media mensual; y la humedad relativa mínima y máxima mensual.

La temperatura media anual es de 17.22°C, mientras que para enero la temperatura media mensual es de 24.80°C. En invierno la temperatura media mensual es de 8.29°C.

Los HDD anuales (Heating degree-days, base 18.3) son de 1231 HDD, mientras que los CDD (Cooling degree-days, base 18.3), son de 911 CDD, ver figura 5. Esto nos indica la necesidad mensual de calefacción y refrigeración (Climate Design Data 2013 ASHRAE Handbook).



Figura 5: Grados días mensuales de calefacción y refrigeración, en función de la irradiancia solar

El potencial bioclimático puede ser un punto de partida práctico para la definición de estrategias de diseño edilicias apropiadas al clima. En las figuras 6, 7 y 8 se muestran las posibles soluciones bioclimáticas con los datos climáticos actuales. En la figura 6, grafica de Olgay modificada se muestran los datos mensuales sobre las estrategias pasivas. Los autores de la herramienta, agregan a los parámetros propuestos por Olgay (Olgay, 1963), la influencia de la irradiancia solar diaria media y máxima recibida, lo que modifica la gráfica original (Kosir et al 2017).

La mayor parte de los datos se encuentran sobre la estrategia de calefacción solar pasiva, y en un porcentaje menor, en los meses intermedios y de verano, ventilación natural combinado masa térmica interior.

Los resultados en la figura 7 y 8, muestran claramente los porcentajes de dichas estrategias que se podrían aplicar para el clima estudiado. En la figura 7, se divide en dos grupos: Necesidades de Sombra, Sh, y necesidades de sol,

Sn. Las estrategias para disipar el calor, Sh, tiene un potencial de 33.6% (8.1% de ventilación natural con masa térmica, y un 25.5% por el uso de sombras). Mientras que las estrategias para la recolección de radiación solar, Sn, tienen un potencial del 66.4% (46.6% por calefacción solar pasiva, 9.3% por calefacción auxiliar y un 10.5% en confort por el uso de radiación solar directa).

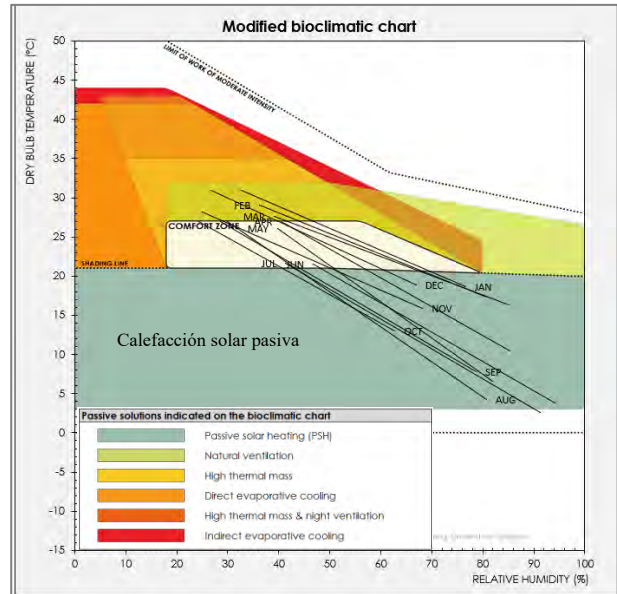


Figura 6: Gráfica de Givoni modificada por Kosir, et al 2017

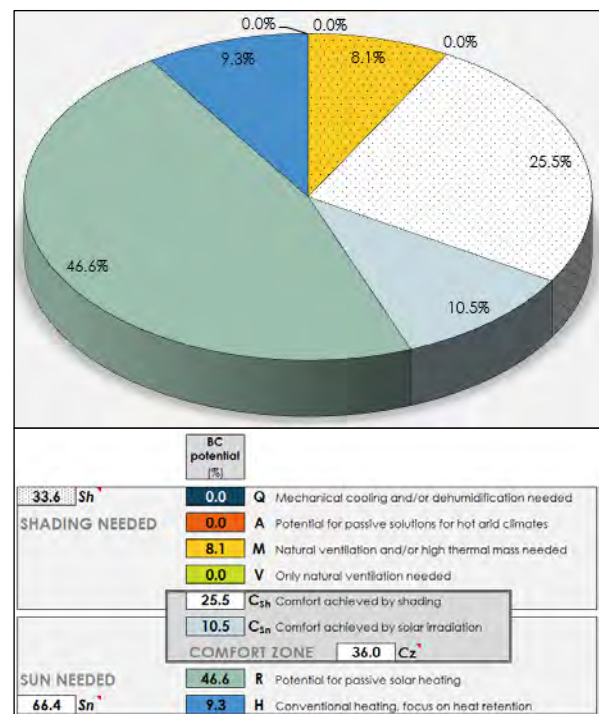


Figura 7: Potencial bioclimático TMY

### Influencia del CC en las estrategias

Para el armado de los archivos EPW futuros, se eligió un modelo del CMIP5 (CC ACCESS 1-3), y se ajustó con datos medidos de reanálisis (CRU TS4.05). El período analizado fue desde 1901 hasta 2020. En la figura 8 se muestran el ajuste de las temperaturas medias anuales de ambos modelos.

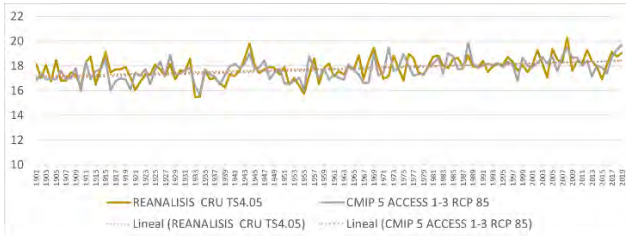


Figura 8: Comparación de temperaturas medias anuales desde 1901 hasta 2020 de: CRU TS4.05 y el modelo de simulación climática ACCESS 1-3.

Los resultados de los indicadores estadísticos, indican errores aceptables. El BIAS o el sesgo entre los datos, resulta de 0.099 °C. El error medio absoluto, MAE, descartando los valores atípicos, resulta de 0.68°C en promedio. Cuando se analiza el coeficiente de concordancia, d, resulta del 72%. Y la desviación estándar de los valores residuales, RMSE, es de 0.88°C, ver tabla 1.

Tabla 1: Indicadores estadísticos del ajuste entre los datos de reanálisis CRU TS4.05 y el modelo ACCESS 1-3 para el escenario RCP8.5

INDICADORES	CRU TS4.05 vs ACCESS 1-3 RCP8.5
<b>d</b>	<b>0.72</b>
<b>MAE (°C)</b>	<b>0.68</b>
<b>RMSE (°C)</b>	<b>0.88</b>
<b>BIAS (°C)</b>	<b>0.099</b>

En la figura 9, se muestran las temperaturas medias anuales del modelo calibrado, desde 1900 hasta el 2100, para el escenario RCP 8.5, para el clima estudiado.

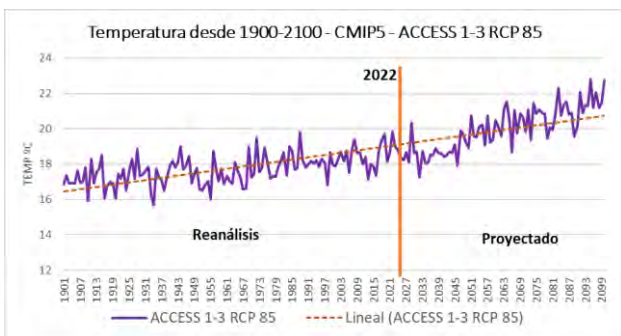


Figura 9: Temperaturas medias anuales, RCP8.5

En la figura 10, se recortan los datos predichos a futuro, 2022-2100, y se observa la tendencia del aumento de temperatura hacia el 2100.

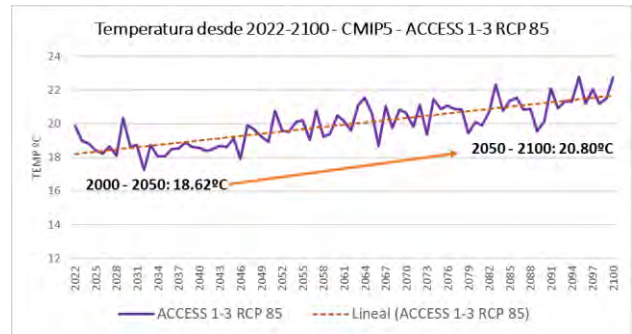


Figura 10: Temperaturas medias para el escenario RCP8.5, período futuro, 2022-2100

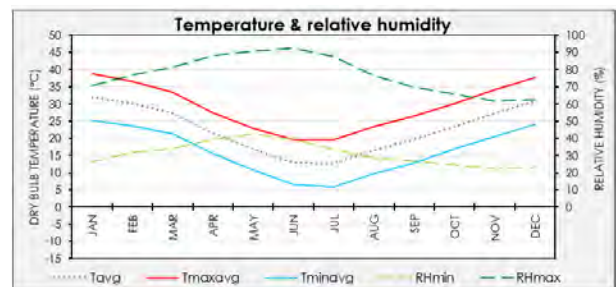
Si comparamos las anomalías en períodos de 50 años desde el 1900, la temperatura hacia el año 2100 podría aumentar en el orden de los 2.18°C, en relación al período pre-industrial para el clima estudiado, ver tabla 2.

Tabla 2: Comparación de los cambios observados en períodos de 50 años.

	ACCESS 1-3	Diferencia al período base 1900-1950
<b>1900-1950</b>	<b>17.37</b>	
<b>1950-2000</b>	<b>17.77</b>	<b>0.40</b>
<b>2000-2050</b>	<b>18.62</b>	<b>0.85</b>
<b>2050-2100</b>	<b>20.80</b>	<b>2.18</b>

Con el modelo ACCESS1-3 ajustado, se utilizaron los datos para armar el EPW, y simular en BcChart, el efecto proyectado del cambio climático en el potencial bioclimático para Mendoza.

La temperatura media anual para el 2100 se espera que sea de 22.50°C (5°C más que el TMY actual), mientras que para enero la temperatura media mensual sea de 31.88°C (7°C mayor que el actual). En julio se espera que



la temperatura media mensual supere a la actual en 4.4°C (12.7°C).

Figura 11: Temperaturas y Humedad relativas, año 2100

Los resultados de las siguientes figuras, muestran claramente que se espera que el potencial bioclimático se desplace hacia las estrategias de disipación de calor. Las estrategias de invierno disminuirán gradualmente, ver figura12.



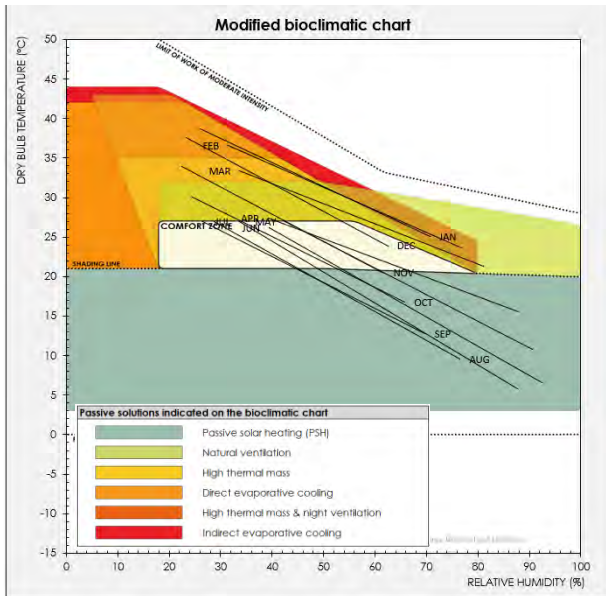


Figura 12: Temperaturas y Humedad relativas, año 2100

Si observamos la figura 13, las necesidades de Sombra,  $Sh$ , se calculan en un 57.6%, o sea 24% más que el clima actual. Dentro de este porcentaje hubo un aumento considerable (de 0% a 12.6%) en la estrategia A, que se refiere a un conjunto de soluciones pasivas para climas áridos y cálidos, incluye: Refrigeración evaporativa directa e indirecta y uso de masa térmica con ventilación natural. La zona de confort por el uso de sombras, descendió de 25.5% a 19.9%.

Si observamos cómo se comportan las estrategias invierno,  $Sn$ , se prevé una disminución de potencial de 66.4% a 42.4%, por ello disminuirán todas las estrategias inherentes a la recolección de radiación solar y calor térmico. El potencial de calefacción pasiva pasará de un 46.6% a 30.1% y la calefacción auxiliar de un 10.5% a un 4%.

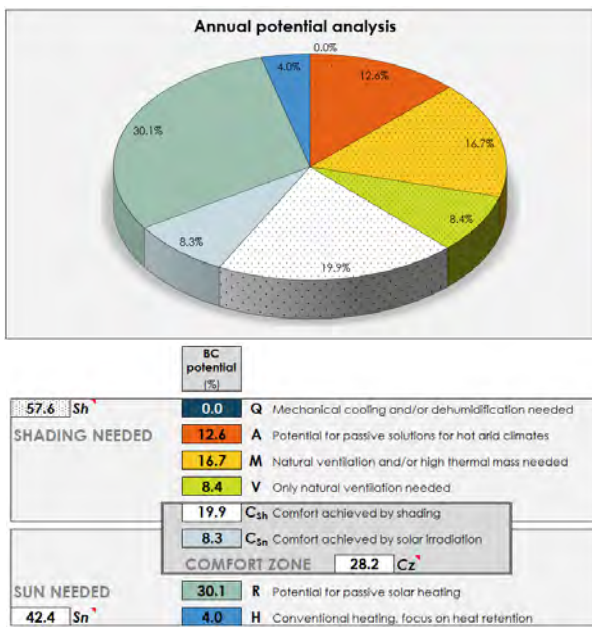


Figura 13: Potencial bioclimático futuro, año 2100

## Conclusiones

El trabajo realiza un aporte al desarrollo metodológico en la elaboración de archivos de clima futuro de acuerdo con proyecciones de cambio climático (IPCC) para la simulación dinámica de edificios. Para el armado de los archivos EPW futuros, se elige un modelo del CMIP5 (en este caso CC ACCESS 1-3), y se ajusta con datos medidos de reanálisis (CRU TS4.05).

La simulación dinámica de edificios con archivos climáticos de elaboración propia, ajustados y validados tanto para la situación actual como futura, es una herramienta indispensable para valorar decisiones de diseño desde una mirada holística garantizando el buen funcionamiento de nuestros edificios a lo largo de su vida útil. La transferencia de los resultados obtenidos a los diseñadores de edificios hace posible conocer qué estrategias pasivas ganarán o perderán importancia debido al calentamiento climático y la magnitud relativa a este cambio.

Para el caso de aplicación que se presenta en Mendoza (Argentina) en el escenario RCP8.5 del CMIP5, (equivalente a un escenario SSP85 del CMIP6), las temperaturas medias anuales podrían incrementarse en 5°C para el 2100, con aumentos de 7°C en las medias mensuales de verano y de 4.4°C en las medias mensuales de invierno. Los resultados muestran una disminución del 20% en la cantidad de horas en confort con un incremento del 24% en la necesidad de estrategias pasivas de verano.

## Limitaciones de este estudio

Los resultados de este estudio se realizaron con el modelo CC ACCESS 1-3, previamente calibrado con datos medidos, ya que el objetivo es aportar metodológicamente al armado de archivos hacia el CC. No obstante, los resultados son extrapolables a otros modelos y escenarios del IPCC.

## Agradecimientos

El trabajo ha sido financiado por el FONCYT PICT 2019-2752 y CONICET PIP 2021-2023 11220200101711CO.

El método morphing se aplicó a través de un código Python desarrollado por la Dra. Silvana Flores Larsen (INENCO-CONICET). Los archivos resultantes se transformaron al formato EPW a través de la aplicación WeatherConverter de EnergyPlus.

## Referencias

- D.H.W. Li, L. Yang, J.C. Lam. 2012. Impact of climate change on energy use in the built environment in different climate zones – a review. Energy 42, pp. 103 – 112.
- El País. 2020. Una apuesta por la renovación urbana. Sección Economía. www.elpais.es.
- Flores-Larsen S., Filippín C., Barea G. 2019. Impact of climate change on energy use and bioclimatic design of residential buildings in the 21st century in Argentina. Energy and Building. Vol 184. Pp 216-229. ISSN 0378-7788. Amsterdam.
- Flores-Larsen, Celina Filippín. 2021. Energy efficiency, thermal resilience, and health during extreme heat events in low-income housing in Argentina. Energy and Buildings 231.

- G.S. Brager, R.J. de Dear. 1998. Thermal adaptation in the built environment: a literature review. *Energy and Building*. 27, pp. 83–96, doi: 10.1016/S0378-7788(97)00053-4.
- Gustavo Barea, M. Victoria Mercado, Celina Filippín, Juan Manuel Monteoliva, Ayelén Villalba, 2022. New paradigms in bioclimatic design toward climatic change in arid environments, *Energy and Buildings*, Volume 266, 112100, ISSN 0378-7788.
- Jentsch M.F., A.S. Bahaj, P.B. James, (2008). Climate change future proofing of buildings -Generation and assessment of building simulation weather files. *Energy and Building*, vol. 40 (12), pp. 2148-2168.
- Kottek M, Grieser J, Beck C, Rudolf B, Rubel F. (2006). World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift* 15(3): p.259-263.
- M. Košir, L. Pajek, BcChart v2.0 – A Tool for Bioclimatic Potential Evaluation, in: Proc. SWC2017SHC2017, International Solar Energy Society, Abu Dhabi, 2017: pp. 1–10. 10.18086/swc.2017.21.04.
- M. Košir, L. Pajek, BcChart v2.1. University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering, (2018). <http://kske.fgg.uni-lj.si/en/research/>.
- M. Košir. Climate Adaptability of Buildings: Bioclimatic Design in the Light of Climate Change. Springer International Publishing Cham (2019). 10.1007/978-3-030-18456-8.
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.-C., Lowe, J., Meehl, G. A., Moss, R., Riahi, K., & Sanderson, B. M. (2016). The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3461–3482. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>.
- S.E. Elias, Climate change and energy. 2017. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, *Encyclopedia of the Anthropocene*, doi: 10.1016/B978-0-12-409548-9.10515-9.
- UN. 2016. Secretaría General de las Naciones Unidas. Acuerdo de París. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.
- 3CN Cima. Base de Datos Climáticos para la 3° Comunicación Nacional (2022). Centro de Investigación del Mar y la Atmósfera (CIMA UBA/CONICET). Disponible en: <http://3cn.cima.fcn.uba.ar/>

## Simulação paramétrica exploratória de soluções para adequação de envoltória com foco em eficiência energética

Erick Fraiha Machado<sup>1</sup>, Arthur Santos Silva<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, Brasil

### Resumo

Diante do desafio contemporâneo de reduzir impactos ambientais com foco na redução de consumo de energia, entende-se que a adoção de materiais com melhor desempenho venha a melhorar o condicionamento passivo de edificações existentes. O objetivo deste trabalho é realizar um experimento de simulação paramétrica com substituição de cobertura, vidros e adoção de brises externos em estudo de caso de uma edificação corporativa da Empresa Brasileira de Correios e Telégrafos, em clima tropical de savana. Por meio de uma amostra de simulações, foi analisada a interação das variáveis de entrada na simulação para estimar a interferência possível dos diferentes materiais e soluções sobre o desempenho energético da edificação.

### Introdução

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas apresentou em 2022 o VI Relatório de Avaliação das Mudanças Climáticas (IPCC, 2022), o qual ratifica os relatórios anteriores quanto aos impactos das emissões de carbono sobre as mudanças climáticas.

Entre as atividades de maior impacto sobre o meio ambiente estão o setor da construção civil e o setor energético. O relatório 2020 Global Status Report For Buildings And Construction aponta que as emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) do setor da construção são as mais altas já registradas. Em um comparativo entre os dados de 2019 e anos anteriores percebe-se que o consumo total final de energia do setor global de edifícios se manteve, mas as emissões de CO<sub>2</sub> relativos à operação dos edifícios aumentaram a cerca de 10 GtCO<sub>2</sub>, o que corresponde a 28% das emissões totais globais de CO<sub>2</sub> pertinentes à energia. Ainda em relação às edificações, o uso de energia representa cerca de um terço do consumo final da energia global e são responsáveis por quase 20% das emissões de gases de efeito estufa em todo o mundo (UNEP, 2020). Ciampi et al. (2021) afirmam que aproximadamente 40% do consumo de energia da União Europeia pode ser diretamente atribuído ao setor da construção, assim como cerca de 36% das emissões de gases de efeito estufa.

A matriz energética mundial apresentada pela Agência Internacional de Energia, indica que mais de 80% da geração de energia no mundo ocorre pela queima de combustíveis fósseis e minerais não renováveis. Diante disto, uma das metas propostas pelos grupos de trabalho do IPCC é a promoção de sistemas mais eficientes e com menor consumo energético (IPCC, 2022).

Outro impacto ambiental a se considerar, no âmbito da sustentabilidade, é a geração de resíduos pela construção civil. Silva, Nagalli e Couto (2021) demonstraram o potencial de recuperação aproximadamente 90% em intervenções com o aproveitamento de edificações existentes, como adequações, *retrofit* ou reformas. Em seu estudo de caso, estimaram a redução de emissão de 35,7 m<sup>3</sup> de resíduos aos aterros, correspondente a 7% do volume total de seu objeto de pesquisa. Consideram assim ser uma abordagem capaz de aumentar a vida útil de uma edificação existente e atenuar o problema da sobrecarga dos aterros.

A grande variedade de configurações e fatores incidentes sobre edifícios existentes não permite uma abordagem única como resposta à demanda. Diante do desafio de redução na emissão de gases de efeito estufa e de adequações das instalações para um melhor desempenho energético, a simulação computacional se apresenta como uma ferramenta precisa e assertiva. Segundo Loonen et al. (2017), a simulação computacional possibilita uma análise integrada do desempenho de diferentes soluções de projeto e operação. Também é um instrumento útil para desenvolvimento de protótipos de novos materiais e sistemas inovadores, assim como para o refinamento de produtos em desenvolvimento. Além disso, permite explorar diferentes estratégias de controle e operação de sistemas, avaliando o desempenho de materiais e sistemas sob diferentes influências climáticas ou demandas.

Com foco na análise termoenergética e baseado na Instrução Normativa INMETRO para a Classe de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviço e Públicas (INI-C), Marques e Silva (2020) realizaram um estudo de caso de edificação pública no município de Campo Grande-MS. Com a simulação de desempenho com o software EnergyPlus<sup>TM</sup> e JEPlus, os autores analisaram 18 configurações da edificação sendo as variáveis a absorvância das paredes externas, o tipo de

cobertura e o tipo de vidro das aberturas na envoltória. O resultado do experimento indicou que a substituição dos vidros simples pelo vidro de controle solar seria capaz de elevar a eficiência da edificação de etiqueta nível C para etiqueta nível B de eficiência energética da envoltória.

Costa, Alvarez e Martino (2021), em um estudo de caso de edifício de escritórios em Vitória-ES, utilizaram a modelagem paramétrica e a simulação de desempenho para avaliação da eficiência energética da edificação. Além dos programas Rhinoceros®, Grasshopper®, Opossum e Honeybee, os autores utilizaram os parâmetros da INI-C (INMETRO, 2022). O resultado desse trabalho indica melhoria de 31% no consumo total de energia primária e redução de 54% na demanda por refrigeração do edifício. Entre as intervenções simuladas, a alteração do tipo de vidro simples por vidro duplo e a instalação de elementos de sombreamento com angulação de 30° mostraram influência significativa nos resultados.

Leone e Florio (2021), na análise da correlação entre estética e desempenho, utilizaram a modelagem paramétrica e a simulação computacional para avaliar o desempenho da iluminação natural em edifícios torcidos. A proposta do trabalho foi avaliar diferentes percentuais de aberturas, assim como a utilização de elementos de sombreamento. Foi observado que o efeito de torção da torre causa autosombreamento em algumas superfícies e expõem outras à maior insolação. Em comparativo com um edifício retilíneo, foi observado que a torção não favorece melhor aproveitamento de iluminação natural, mas reduz a necessidade de elementos de sombreamento em toda a fachada devido ao autosombreamento. Entretanto, o edifício retilíneo apresentou melhor desempenho em todas as configurações propostas aos modelos.

Este artigo tem o objetivo de apresentar um experimento de simulação paramétrica de *retrofit* energético, considerando a substituição de cobertura, vidros e adoção de brises externos em estudo de caso de uma edificação corporativa da Empresa Brasileira de Correios e Telégrafos (Correios), em clima tropical de savana, da cidade de Campo Grande - MS. Por meio de parametrização dos elementos de composição da envoltória, o trabalho se propõe a explorar possibilidades de intervenção e os impactos que estas geram sobre as temperaturas nos ambientes internos, e consequente implicação na economia de energia demandada pelo sistema de climatização da edificação.

## Método

A partir do estudo de caso da edificação dos Correios, definiu-se as diretrizes que configuram condições de conforto e eficiência, com base nas normativas técnicas da Instrução Normativa Inmetro para a Eficiência Energética das Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas, INI-C (INMETRO, 2022).

Trata-se de um experimento computacional de caráter exploratório executado em um modelo com configurações compatíveis à condição real do edifício. Foi simulada uma

amostra de alternativas da envoltória para a comparação do desempenho energético submetida ao mesmo contexto bioclimático e de rotinas do edifício em condição real.

A edificação foi modelada no software de modelagem tridimensional Rhinoceros® (Rhino), versão 7.

As definições de elementos e materiais construtivos que configuram o modelo, bem como os atributos destes materiais como transmitância térmica, absorvância, refletância e outras, são dados de entrada gerenciados pelo Grasshopper® e Honeybee, *plug-ins* vinculados ao Rhino. Este mesmo aplicativo também gerencia as rotinas de ocupação e operação dos sistemas internos como iluminação, climatização e uso de equipamentos elétricos, assim como o acionamento de dispositivos de sombreamento e ventilação atribuídas ao modelo computacional. As configurações climáticas dos locais são gerenciadas pelo *plug-in* Ladybug. Os cálculos foram processados usando o EnergyPlus™ e OpenStudio®, gerenciados pelo Grasshopper®.

Os resultados obtidos nas simulações foram analisados com base nos indicadores de desempenho definidos. Destas análises procedem considerações a respeito dos impactos que as medidas de condicionamento propostas exercem sobre o desempenho energético da edificação.

## Modelo Real

O modelo real foi construído a partir de informações levantadas nos projetos disponibilizados pelos Correios e por levantamentos arquitetônicos *in loco*. O Modelo Real (MR) é uma edificação de 4.800,00 m<sup>2</sup>, de planta retangular com 40,0 m no sentido norte-sul e 60,0 m no sentido Leste-Oeste. Possui dois pavimentos, com estrutura em concreto armado, cobertura em estrutura metálica e telhas de fibrocimento ondulada de 6mm. Parte do segundo piso possui laje maciça de concreto sob o telhado e a maior parte possui apenas forro de fibra de vidro isolando o ático abaixo do telhado. As vedações externas são de alvenaria de bloco cerâmico de oito furos com reboco interno e revestimento externa em lajotas cerâmicas em cor terracota. A estrutura da cobertura possui *shed* com ventilação permanente e fechamentos em telhas onduladas translúcida de fibra de vidro, com orientação para a fachada oeste, mas estas aberturas zenitais estão inutilizadas para iluminação natural devido a presença do forro de fibra de vidro. A laje intermediária de piso é de concreto maciça, com espessura de 15cm. Nos dois pavimentos o piso é de concreto industrial polido de alta resistência com granilhas minerais.

As superfícies verticais expostas da envoltória, que compreendem as paredes opacas e as aberturas, somam 2.186,00 m<sup>2</sup> de área. As superfícies envidraçadas compreendem 766,21 m<sup>2</sup> que representam 16% de toda a envoltória. A somatória dos planos que compõem a cobertura corresponde a área total de 2.462,66 m<sup>2</sup>, que representa 53% de toda a envoltória exposta. A somatória total de superfícies da envoltória corresponde a 4.642,66 m<sup>2</sup>.

Como a edificação está localizada em terreno plano e ocupa metade de uma quadra, sem edificações confinantes nas adjacências e afastamentos de entorno de pelo menos 20,0 m de distância, optou-se por não considerar a interferência de edificações do entorno.

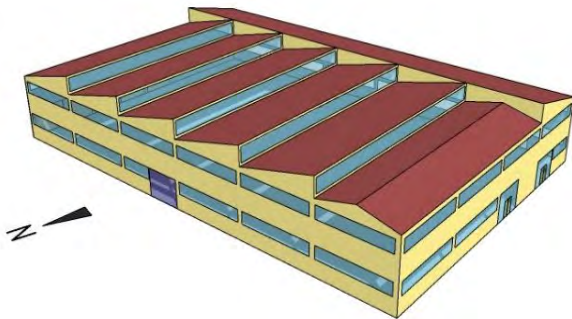


Figura 1: Volumetria do Modelo Real

O Modelo Real está localizado na região urbana central do município de Campo Grande-MS, cidade localizada no Centro Oeste brasileiro, latitude 20°27'07" S e longitude 54°33'23" O. É uma região sob influência da continentalidade, o que provoca uma elevada amplitude térmica ao longo do ano e mesmo durante o dia na estação mais seca. O município está localizado na região de classificação Zona Bioclimática 6 na referência correspondente ao zoneamento bioclimático brasileiro proposto pela ABNT NBR15220-3 (ABNT, 2005), e adotada pela INI-C (INMETRO, 2022).

O Modelo Real resultou em 24 zonas térmicas. As propriedades térmicas dos elementos construtivos foram obtidas da NBR 15520-2 (ABNT, 2008). As propriedades de espessura, condutividade térmica, densidade de massa, calor específico, resistência térmica e capacidade térmica dos elementos de composição do modelo foram dados de entrada no *script* de composição dos materiais e seguiram os parâmetros tabelados, assim como eventuais cálculos conforme orientações da referida norma técnica. Todos os elementos construtivos foram parametricamente configurados por meio do Honeybee e relacionados às modelagens e condicionantes operacionais e climatológicas correspondentes a cada uma das zonas térmicas correspondentes.

Considerando atividades distintas entre o pavimento térreo e o pavimento superior, e tomando como referência a ISO 7730 (2005) pode-se classificar a atividade administrativa no pavimento superior como atividade sedentária com taxa metabólica de 70 W/m<sup>2</sup>.pessoa. Já a atividade operacional no pavimento térreo é similar aos trabalhos domésticos com movimentação moderada e manejo de objetos leves. Foi considerado que o tratamento de cargas pesadas é uma atividade operacionalizada por meio de equipamentos que eliminam o esforço físico como empilhadeiras e paletes elétricas. Sendo assim, estima-se que a taxa metabólica de pessoas envolvidas na atividade operacional seja de 116 W/m<sup>2</sup>.pessoa.

Para simular condição mais fiel a realidade, os parâmetros de ocupação levaram em consideração o efetivo informado pela empresa nas respectivas áreas de atividade. Na área administrativa adotou-se para a densidade de ocupação o valor de 0,06 pessoas/m<sup>2</sup> e na área operacional 0,03 pessoas/m<sup>2</sup>. A densidade de potência de equipamentos também foi estimada de acordo com levantamentos *in loco* definida em 10,83 W/m<sup>2</sup> na área operacional e 20,37 W/m<sup>2</sup> na área administrativa. O horário de ocupação adotado corresponde a rotina de 10 horas com rotina a das 8h às 18h, com 260 dias de ocupação/ano, mas com algumas variações de acordo com as atividades de cada setor.

Foi considerado um modelo simplificado de ventilação natural com acionamento do fluxo de ar com temperaturas externas entre 20°C e 24°C. O sistema de climatização foi configurado como "cargas ideais", relacionado com a base de dados climatológico locais, com *setpoint* de resfriamento em 25°C. Foi desconsiderado o uso de aquecedores nos ambientes. O sistema de climatização está limitado às zonas térmicas que abrigam atividades administrativas, sendo que as zonas térmicas de atividades operacionais utilizam apenas o modelo de ventilação natural.

#### Variáveis independentes

Foram realizadas simulações do Modelo Real e mais 11 modelos com variáveis independentes relativas à envoltória e estão descritas na Tabela 1. A volumetria, a compartimentação, as rotinas, cargas internas e fatores bioclimáticos são invariáveis entre os modelos comparados.

Tabela 1: Amostra de simulações

Modelo	Cobertura	Vidro	Brise
MR	FIB	VC	SEM
M1	EPS	VC	SEM
M2	LVI	VC	SEM
M3	FIB	VR	SEM
M4	EPS	VR	SEM
M5	LVI	VR	SEM
M6	FIB	VC	COM
M7	EPS	VC	COM
M8	LVI	VC	COM
M9	FIB	VR	COM
M10	EPS	VR	COM
M11	LVI	VR	COM

Em relação à cobertura foi proposta a manutenção da telha de fibrocimento 6mm (FIB) e mais duas opções o tipo de telha sendo a primeira a telha metálica térmica com isolante interno em poliestireno expandido com 5cm de espessura (EPS), e a segunda opção a telha metálica sanduíche com isolante interno em lã de vidro com 5cm de espessura (LVI). Para as propriedades termofísicas das telhas, tomou-se por base as referências da NBR 15220-2 (ABNT, 2008).

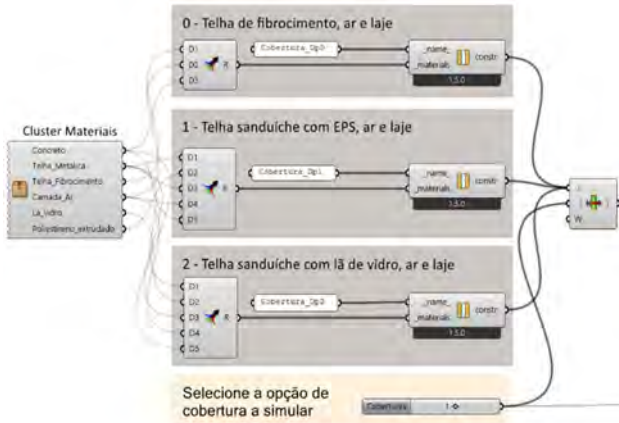


Figura 2: Script parametrização da cobertura

Para simular desempenho das janelas foi proposto o vidro simples de 6mm presentes na condição original das esquadrias (VC) e o vidro reflexivo 6mm (VR). O vidro reflexivo adotado foi o vidro monolítico 6mm Cool-Lite SKN154, fabricante Cebrace. Este material possui transmitância 3,139 W/m<sup>2</sup> K, fator solar 0,29, transmissão luminosa de 0,552 e reflexão luminosa de 0,155.

A terceira variável é a presença (COM) ou ausência (SEM) de brises metálico externo como elemento de sombreamento das janelas. O sistema foi configurado com aletas metálicas horizontais de 25 mm espaçadas a cada 18 mm instaladas externamente a 50 cm das esquadrias, com condutividade térmica de 55W/m K.

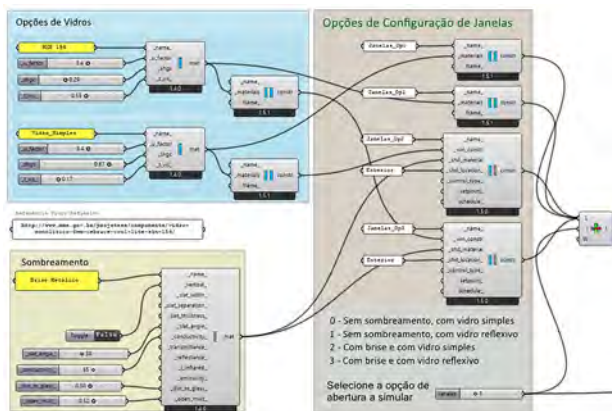


Figura 3: Script parametrização de janelas

### Indicadores de desempenho

Para avaliar o desempenho dos modelos adotou-se o indicador de Consumo Geral de Energia para Resfriamento (kWh/m<sup>2</sup>.ano). Para estimativa do conforto térmico, foi configurado o modelo adaptativo da ASHRAE 55 (2020), usando como indicadores os

percentuais de horas ocupadas dentro dos intervalos de conforto térmico.

### Análise e discussão

Simulando as doze composições, incluindo o Modelo Real, chegou-se ao resultado de consumo total de energia elétrica para cada uma das configurações. Este resultado compreende energia demandada pelos modelos para operar a iluminação, equipamentos e climatização. Os resultados para energia requerida para iluminação e equipamentos apresentou variação mínima. Verifica-se que o indicador com maior variação entre as amostras e ao longo dos meses é a energia demandada para resfriamento. A variação registrada entre os diferentes models simulados está inscrita na Tabela 2.

Tabela 2: Consumo de energia elétrica

Modelo	Resfriamento (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	Economia (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	Economia (%)
MR	14,77		
M1	11,91	-2,86	-19,4%
M2	11,95	-2,82	-19,1%
M3	13,45	-1,32	-8,9%
M4	10,41	-4,36	-29,5%
M5	10,47	-4,3	-29,1%
M6	14,19	-0,58	-3,9%
M7	11,18	-3,59	-24,3%
M8	11,23	-3,54	-24,0%
M9	13,45	-1,32	-8,9%
M10	10,32	-4,45	-30,1%
M11	10,38	-4,39	-29,7%

Os resultados apontam que todas as intervenções apresentaram melhoria no desempenho da envoltória quanto ao desempenho energético para resfriamento. Quanto ao consumo de energia, os resultados que sinalizam menor impactos são os modelos M3, M6 e M9, sendo que estes são modelos em que se manteve a condição original de cobertura em telhas de fibrocimento 6mm.

Entre os modelos que apresentaram maior economia de energia estão os modelos M4, M5, M10 e M11, com ligeira vantagem nos modelos M4 e M10, ambos modelos com telha térmica EPS. Uma análise comparativa apenas em relação à cobertura verifica-se que a simples substituição da cobertura de fibrocimento por telhas térmica EPS promovem economia de 19,4% no consumo energético anual, enquanto a telha térmica com lâ de vidro promove uma economia de 19,1% no mesmo indicador. Estes dados confirmam a alta relevância da cobertura no desempenho da edificação e que ambas as telhas térmicas possuem desempenho energético muito semelhante.

O M3 mantém a configuração do MR, apenas com a substituição do vidro simples 6mm por vidro reflexivo e promove uma redução de consumo de 8,9%. O M6, que mantém a configuração do MR com acréscimo de brises metálicos externos, apresentou economia de 3,9%. Entretanto, convém considerar que o elemento de

proteção sombreou apenas os vão configurados como janelas. Também importa destacar que o dispositivo limitou-se a angulação das aletas fixas em 45°, não se adaptando adequadamente à trajetória solar e às diferentes incidências em cada uma das fachadas.

Dentre todas as simulações, o M10 foi o modelo que apresentou melhor resultado, sendo que a Figura 4 mostra o detalhamento do consumo de energia para resfriamento ao longo dos meses. A configuração deste modelo apresenta a substituição da cobertura pela telha térmica EPS e dos vidros comuns pelos vidros reflexivos e promove uma redução de 30,1% no consumo energético anual. E diante deste desempenho, foi verificado o consumo mensal estimado para o modelo M10 que foi comparado ao consumo estimado para o modelo MR.

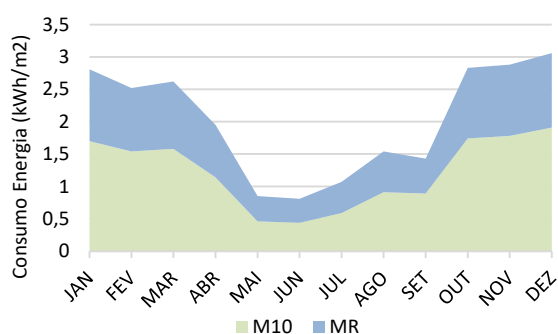


Figura 4: Comparativo de consumo energia para resfriamento mensal do Modelo Real e Modelo 10

A Figura 4 confirma o impacto positivo na economia de energia para o resfriamento dos ambientes internos com a substituição da cobertura, dos vidros e a adoção de brises para sombreamento das aberturas, conforme M10. A economia é verificada pelo afastamento entre as linhas do gráfico, sinalizado pela cor azul, que ocorrem ao longo de todo o ano, com intensidade maior nos meses mais quentes.

Diante destes dados, verificou-se o desempenho da mesma configuração do M10 e do MR em relação ao conforto térmico para um comparativo de desempenho em relação a este indicador. Vale ressaltar que a simulação considera o uso de modelo configurado para ventilação natural com abertura de sistema de ventilação quando a temperatura externa estiver entre a mínima de 20°C e máxima de 25°C. O *script* simula as condições de conforto apenas nos horários indicados com presença humana na rotina da ocupação da edificação.

Esta verificação mostrou que o condicionamento da envoltória nas configurações do M10 também teve melhor nível de conforto térmico médio nos ambientes internos da edificação, passando de 47,5% horas de conforto no MR para 56,3% no M10. Com relação ao desconforto por calor a diferença é ainda maior. Enquanto no MR 33,5% do tempo de ocupação era acometido de desconforto por calor, em M10 este percentual diminuiu para 21,4% do tempo de ocupação.

## Considerações Finais

Este artigo mostrou um experimento computacional de caráter exploratório em um estudo de caso de edificação corporativa com ambientes de atividade administrativas e ambientes de atividade de operação logística. Observando as propriedades físicas e condicionantes incidentes ao edifício existente, foi estabelecido como modelo para o cálculo dos indicadores de desempenho frente a amostra de simulações experimentais com diferentes configurações de envoltória abrangendo as coberturas, vidros das esquadrias e sistema de sombreamento.

A substituição da cobertura mostrou ser a intervenção mais influente sobre o consumo total de energia anual, promovendo uma economia de 19,4% de energia em relação a estimativa obtida a partir do Modelo Real. Menos expressivas, mas ainda com relevante impacto, foi verificada que a substituição de vidros comuns por vidros refletivos proporcionou uma redução de 8,9% no consumo de energia e a adoção de mecanismo de sombreamento que contribuiu com 3,9%.

A economia de energia atingida está diretamente relacionada a melhoria no conforto térmico sendo perceptível o impacto acentuado sobre consumo energético específico para o resfriamento dos ambientes.

O tratamento por sombreamento das janelas com brises metálicos externos se mostrou pouco eficiente na configuração utilizada. Entretanto, estudos mais apurados considerando mecanismos de parametrização relacionados a exposição de cada fachada, assim como em relação a angulação dos raios solares certamente deve apresentar resultados melhores. Outrossim, analisar o desempenho de sombreamento também das superfícies opacas da fachada, e não apenas as janelas como foi executado neste experimento, são abordagens relevantes para próximos trabalhos.

## Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio do Programa de Pós-Graduação em Eficiência Energética e Sustentabilidade (PPGEES), à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), código de financiamento 001.

## Referências bibliográficas

- ABNT (2008). NBR 15220-2: Desempenho térmico de edificações, Parte 2. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Versão corrigida.
- ABNT (2008). NBR 15220-2: Desempenho térmico de edificações, Parte 3. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Versão corrigida.
- ASHRAE (2010). Standard 55, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. American Society of Heating, Refrigerating and AirConditioning Engineers, Inc.

- Ciampi, G. et al. (2021). Energy performance of PVC-Coated polyester fabric as novel material for the building envelope: Model validation and a refurbishment case study. *Journal of Building Engineering*, v. 41.
- Costa, L. M. da; Alvarez, C. E. de; and J. A. de Martino (2021). Proposta de método de projeto baseado no desempenho para edifícios energeticamente eficientes. *Ambiente Construído*, v. 21(2), abr. 2021.
- INMETRO. (2022). Instrução Normativa para a eficiência energética de edificações comerciais, de serviços e públicas – INI-C. - Portaria Nº 309, de 6 de setembro de 2021. *Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia* Disponível em: <http://www.pbenedifica.com.br/> Acesso em : 15/10/2022.
- IPCC (2022). Synthesis Report of the Sixth Assessment Report. *Intergovernmental Panel on Climate Change* Disponível em: [www.ipcc.ch/](http://www.ipcc.ch/) . Acesso em 25/10/2022.
- ISO 7703 (2005). Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. *International Standard*. Ed.3.
- Leone, C. and W. Florio (2021). Análise paramétrica de iluminação natural e de proteção solar de edifícios torcidos. *Ambiente Construído*. V.21, n. Ambient. constr., 2021 21(4). Out. 2021.
- Loonen, R. C. G. M. et al. (2017). Review of current status, requirements and opportunities for building performance simulation of adaptive facades. *Journal of Building Performance Simulation*, v. 10, n. 2, p. 205–223.
- Marques, G. M. and A.S. Silva (2020). Avaliação da eficiência energética da envoltória de um edifício público de acordo com método de simulação da INI-C. In: *Encontro Nacional de Tecnologia Do Ambiente Construído*, 18., 2020, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2020.
- Silva, R. C. da; Nagalli, A. and J. P. Couto (2021). Avaliação do potencial de recuperação de edificações ao fim da vida útil: caso de uma instituição federal de ensino superior TT - Evaluation of the potential for building recovery at the end of its useful life: case of a federal institution of higher education. *Interações*, v. 22, n. 3, p. 731–745. 21.
- UNEP (2020). Emissions Gap Report 2020. *United Nations Environment Programme*. Nairobi, 2020. Disponível em: <https://www.unep.org/emissions-gap-report-2020>. Acesso em: 27/06/2021.



## Simulação de iluminação natural conforme NBR 15.575 e análise de desempenho de edificação utilizando tecnologia BIM

Gabriela Sardinha Pacheco

Universidade Federal Fluminense (UFF), Rio de Janeiro, Brasil

[gabrielasardinhapacheco@id.uff.br](mailto:gabrielasardinhapacheco@id.uff.br)

### Resumo

O objetivo deste trabalho é demonstrar como o uso da tecnologia BIM (Building Information Modeling) pode contribuir para a realização de simulação lumínica referente à NBR 15.575 e de análises de desempenho da edificação durante o processo projetual. Embora o programa computacional Autodesk Revit 2023 possua algumas limitações quanto à adequação à NBR 15.575, o trabalho busca apresentar o potencial da ferramenta quanto à dinamicidade do programa e da qualidade de resultados que podem ser obtidos. Além disso, o recurso Insight da Autodesk, pode contribuir durante o processo de projeto, auxiliando para obtenção de um melhor desempenho.

Palavra-chave: Simulação computacional. Iluminação natural. Desempenho de edificações. Building Information Modeling (BIM). Revit.

### Abstract

The aim of this work is to present how the use of Building Information Modeling (BIM) technology can contribute to the production of natural illumination simulation regarding NBR 15.575 as well as building performance analysis during the project processes. Even though the Revit 2023 program has some limitations regarding NBR 15.575, this work aims to demonstrate the tool's potential in terms of dynamic and quality of results that can be obtained. In addition, the Insight Autodesk program can contribute during the process of the project, by providing building performance information.

Key words: Simulation. Natural illumination. Building performance. Building Information Modeling (BIM). Revit.

### Introdução

As avaliações de desempenho de edificações podem ser realizadas por meio de diferentes programas de modelagem e softwares de simulação computacional, o que possibilita o desenvolvimento de um projeto arquitetônico alinhado com os níveis de eficiência e atendimento aos requisitos das normas existentes (Oliveira et al., 2016).

Apesar de existirem diversos programas de simulação, a maioria dessas ferramentas estão distantes da realidade dos escritórios de arquitetura, o que restringe ainda mais o seu uso a especialistas da área (Freire e Amorim, 2011).

Para maior disseminação e difusão do uso de programas de simulação são necessários softwares que reduzam o tempo utilizado durante o processo de modelagem e análise de possíveis alternativas na fase de projeto (Mendes et al., 2005).

Nesse contexto, a tecnologia BIM une a modelagem arquitetônica detalhada e a simulação de iluminação natural e desempenho de edificações. Com isso, é possível desenvolver projetos de maneira mais dinâmica e otimizada, além de obter resultados possivelmente cada vez mais próximos da realidade (Ruschel, 2010).

Dentro do universo BIM, um dos programas computacionais que se consolidou como ferramenta para projetos acompanhando as tendências do mercado, é o Autodesk Revit (Queiróz, 2016).

O software utilizado neste trabalho é o Autodesk Revit 2023, junto ao plugin Insight Lighting Analysis e o recurso Insight Autodesk. Assim, após a conclusão da modelagem arquitetônica é possível obter resultados de simulações lumínicas e de desempenho da edificação com apenas algumas configurações básicas, que serão apresentadas neste trabalho.

Para o processo de simulação do software mencionado, ainda existem algumas limitações do programa quanto à adequação a norma de desempenho NBR 15.575.

Outrossim, o Revit também possui integração com o Insight. Esse recurso permite diversas análises que podem contribuir significativamente durante o processo projetual, e assim permitir que o projeto passe por adequações com intuito de atingir o melhor nível de desempenho possível.

### Simulação de Iluminação Natural conforme NBR 15.575.

#### Configuração do Autodesk Revit para Simulação

Para realizar a simulação lumínica e análise de desempenho, foi utilizada a modelagem e os resultados de simulação obtidos de um trabalho de graduação cujo tema é “Projeto de uma Instituição de Longa Permanência para Idosos e sua relação com conforto ambiental e eficiência energética”. Pacheco, G.S (2022).

A seguir, é apresentada uma imagem do projeto e em seguida a planta baixa das unidades habitacionais avaliadas.



Figura 1: Render do Projeto.

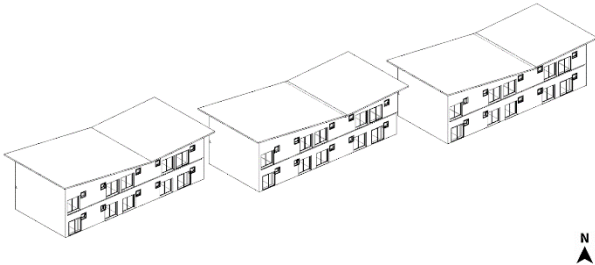


Figura 2: Modelagem das unidades habitacionais.

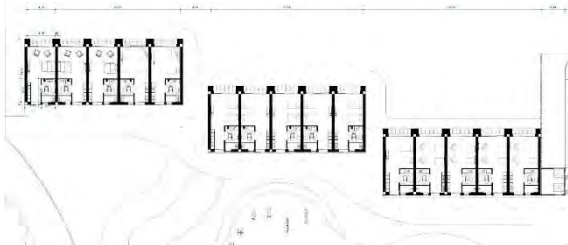


Figura 3: Planta Pavimento Tipo das unidades habitacionais.

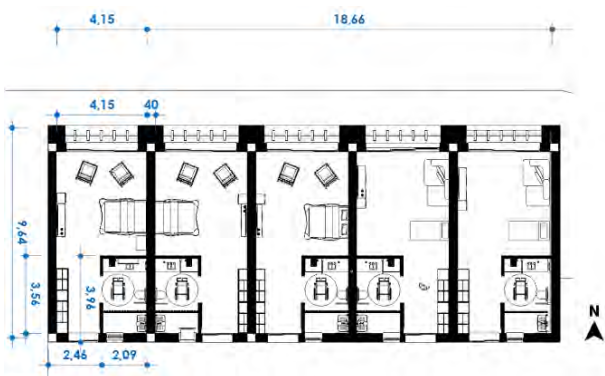


Figura 4: Bloco das unidades habitacionais.

Para a configuração da simulação de iluminação natural é necessário inserir os seguintes dados: localização do projeto, pavimento de análise, data e hora da simulação, quantidade de nebulosidade e os limites mínimo e máximo para a análise de desempenho lumínico.

De acordo com a NBR 15.575, deve-se realizar a simulação para os dias 23 de abril e 23 de outubro, ambos para os horários de 9:30 e 15:30. Nessa etapa, é possível

notar uma limitação do programa, pois ele aceita somente inserções de hora em hora. Além disso, a quantidade de nebulosidade não pode ser editada, sendo restrita aos parâmetros do dia e hora selecionados.

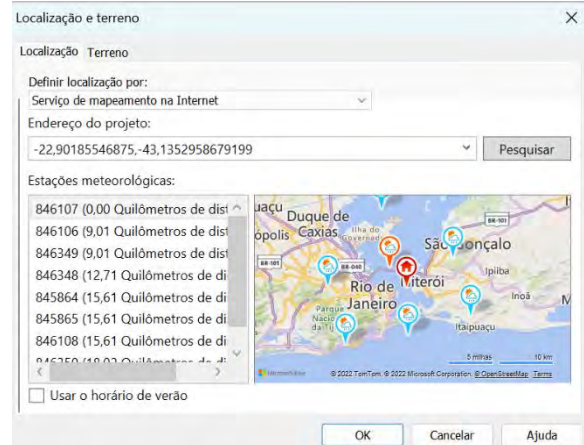


Figura 5: Configuração de localização do projeto

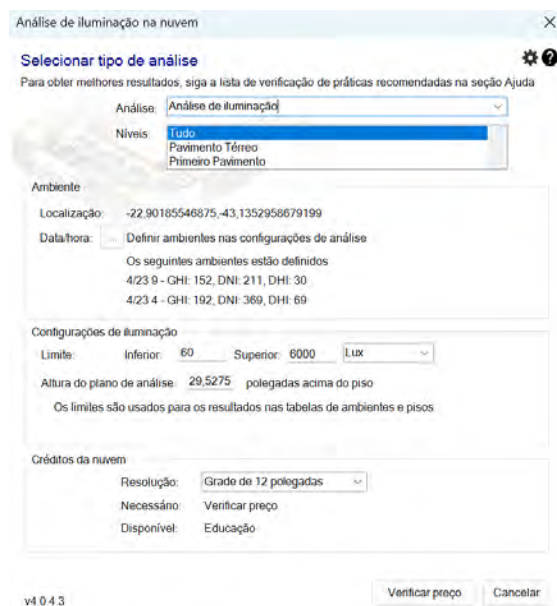


Figura 6: Configurações de limite e plano de referência

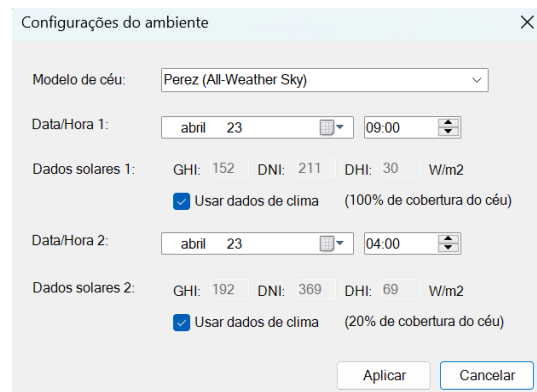


Figura 7: Configurações do clima e dos horários e datas de simulação.

Após a inserção desses dados o programa irá gerar um mapa de resultados que podem ser analisados. O Autodesk Revit 2023 permite a definição de limites e a definição de uma legenda de maneira personalizada para uma melhor visualização e compreensão dos dados.

**Discussão e análise dos resultados**

A simulação de iluminação natural foi realizada para os horários de 9h e 16h dos dias 23 de abril e 23 de outubro. Considerando as limitações do programa já mencionadas anteriormente, esses horários foram escolhidos com intuito de simular para os possíveis horários mais críticos referente à iluminação natural. Todas as unidades habitacionais foram simuladas exceto os banheiros, que estão representados em branco, já que não é um requisito da norma. O valor mínimo de iluminância (lux) de acordo com a NBR 15.575 é de 60 lux. Um valor abaixo do mínimo necessário é representado por uma cor cinza, de acordo com a legenda. Dessa maneira, os resultados obtidos através das configurações apresentadas e a legenda são apresentadas a seguir:

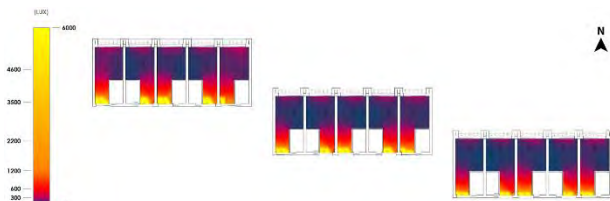


Figura 8: Simulação do Pavimento Térreo para 9h do dia 23 de Abril.

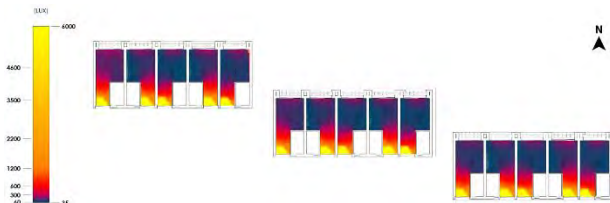


Figura 9: Simulação do Primeiro Pavimento para 9h do dia 23 de Abril.

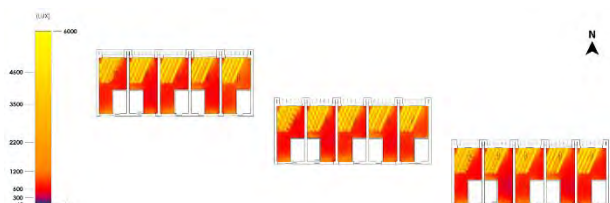


Figura 10: Simulação do Pavimento Térreo para 16h do dia 23 de Abril.

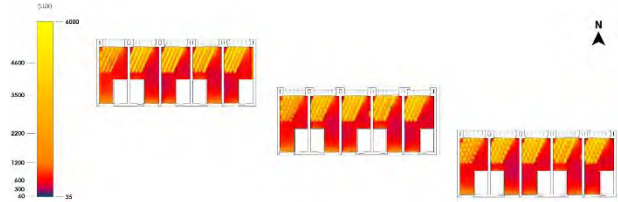


Figura 11: Simulação do Primeiro Pavimento para 16h do dia 23 de Abril.

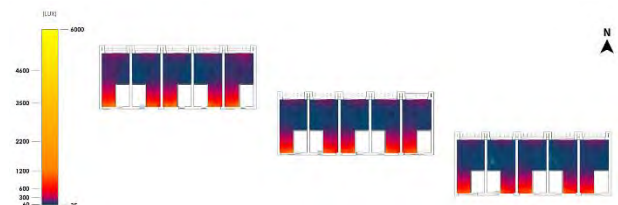


Figura 12: Simulação do Pavimento Térreo para 9h do dia 23 de Outubro.

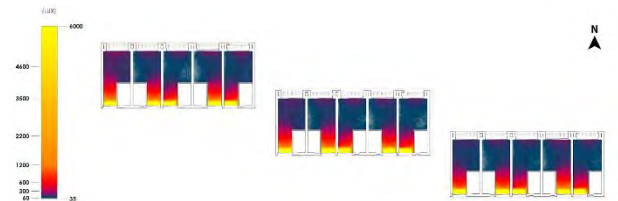


Figura 13: Simulação do Primeiro Pavimento para 9h do dia 23 de Outubro.

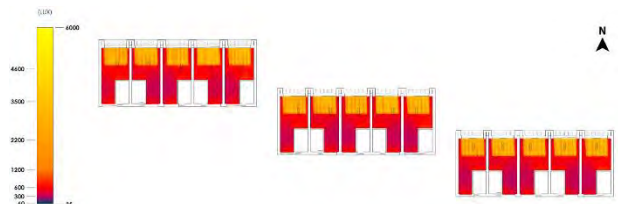


Figura 14: Simulação do Pavimento Térreo para 16h do dia 23 de Outubro.

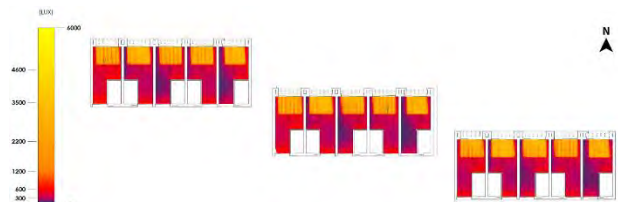


Figura 15: Simulação do Primeiro Pavimento para 16h do dia 23 de Outubro.

Pode-se observar que todos os ambientes atendem à norma de desempenho mencionada, apresentando níveis de iluminância maiores que 60 lux. Ademais, é possível notar que pela manhã há uma maior iluminância pela fachada leste, por conta do sol da manhã. Já na parte da tarde, os maiores níveis de iluminância são próximos a fachada oeste, que recebe o sol da tarde. Ademais, na

fachada oeste da unidade habitacional não há edificações que bloqueiam a incidência da luz solar. Já na fachada leste, há uma edificação próxima fazendo com que um menor nível de iluminância incida na fachada.

### Autodesk Insight

Uma outra possibilidade de análise de desempenho quando utilizado o Autodesk Revit 2023, é o Autodesk Insight. Essa ferramenta permite análise do projeto e sugere possíveis melhorias relacionadas à orientação da edificação, material das paredes e telhados, melhorias de sistemas de iluminação entre outros. Essas possibilidades podem ser visualizadas na imagem a seguir.

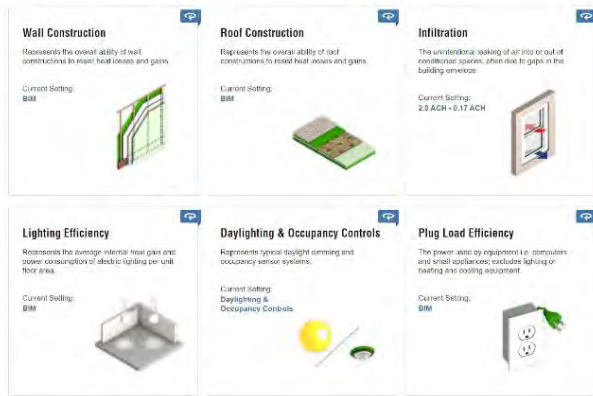


Figura 16: Insight.

Para verificar as sugestões de melhoria, é necessário clicar na opção e então aparecerá uma janela como a apresentada a seguir.

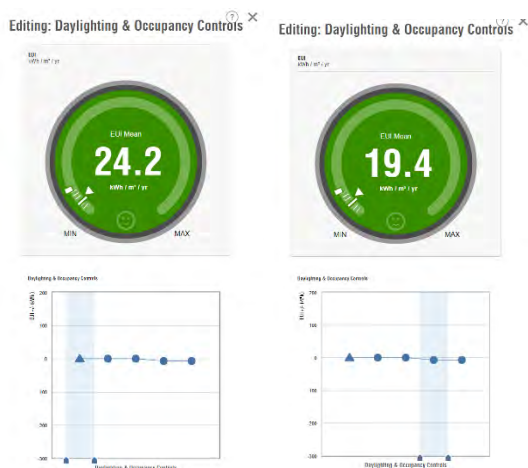


Figura 17: Insight.

Nessa etapa, o triângulo representa o estágio do projeto atual e os círculos são as possibilidades de alteração. Essas opções de alteração podem melhorar ou piorar o desempenho das edificações. Quando alterado, é possível observar o quanto de energia está sendo economizado, o que contribui na escolha da melhor opção além de

também auxiliar um projeto com maiores níveis de desempenho.

### Conclusão

Com objetivo de contribuir para um melhor desenvolvimento projetual visando a qualidade de desempenho de edificações e de demonstrar o potencial do uso da tecnologia BIM com o Autodesk Revit 2023, Plug-in Insight Lighting Analysis e o recurso Insight Autodesk, foi possível realizar simulações de desempenho lumínico e análises de melhorias de desempenho gerais para o projeto. Embora seja possível simular para desempenho lumínico, o software possui algumas limitações quanto à data e horário da simulação e à quantidade de nebulosidade. Para esse trabalho, a simulação foi feita para 9h e 16h ao invés de 9:30h e 15:30, considerando que poderiam ser os horários mais críticos para obtenção dos níveis de atendimento mínimo da norma de iluminação natural. Quanto ao valor de nebulosidade, foram utilizados os valores fornecidos pelo programa com intuito de preservar os dias escolhidos para simulação. Embora algumas limitações tenham sido identificadas, o objetivo do trabalho é demonstrar o potencial das ferramentas apresentadas e como a tecnologia BIM pode contribuir para obtenção de resultados de alta qualidade e compreensíveis de maneira dinâmica, rápida e integrada com o projeto arquitetônico desenvolvido através do mesmo programa.

### Referências

Pacheco, G.S. (2022). Projeto de uma instituição de Longa Permanência para Idosos e sua relação com conforto ambiental e eficiência energética. Disponível em: <https://app.uff.br/riuff/>

ABNT. Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 15575: Edificações habitacionais - Desempenho. Rio de Janeiro, 2013.

Autodesk Insight. Insights. Disponível em: <https://insight.autodesk.com/OneEnergy/Insight>

Queiróz, G. R. et al. (2016) Análise da interoperabilidade entre os programas computacionais Autodesk Revit e EnergyPlus para a simulação térmica de edificações.

Oliveira, L. K. S. et al. (2016). Simulação computacional da eficiência energética para uma arquitetura sustentável. *HOLOS*, v.4, n. 32, p. 217-230.

Freire, M. R.; Amorim, A. L. (2011). A abordagem BIM como contribuição para a eficiência energética no ambiente construído.

Mendes, N. et al. (2015) Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 5, n. 4, p. 47-68.

Ruschel, R. et al. (2010) Building information modeling para projetistas. *Qualidade no projeto de edifícios*. São Carlos: ANTAC. p 137-138.

## Vidros de Controle Solar e Insulados em Habitações Sociais Um estudo de simulação em diferentes latitudes

Laila Dutra da Rocha<sup>1</sup>, Lucas Adler Rodrigues Procheira<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil

### Resumo

O presente trabalho busca aprofundar a discussão da utilização de vidros de controle solar e insulados em Habitações de Interesse Social (HIS), visto que eles são mais encontrados em edifícios comerciais. O desempenho positivo desses vidros incentiva sua utilização, todavia é necessário compreender o local e seu clima para a obtenção de uma melhor economia energética que viabilize o seu custo superior comparado ao vidro comum. Utilizou-se de modelagem computacional aliada à simulação para comparar os consumos energéticos de vidros simples, de controle solar e insulados, para três cidades brasileiras de climas diferentes. Os resultados evidenciaram que o vidro que fornece melhor economia varia de acordo com a localidade, o que sugere a necessidade da análise climática durante a tomada de decisões projetuais.

### Introdução

Segundo estudos da Agência Internacional de Energia (IEA, 2021), o consumo de energia elétrica mundial em 2019 foi de 89,3 EJ, configurando aumento de 27,8% se comparado ao ano de 2010. No Brasil, o ano de 2020 registrou o consumo de 475 TWh (EPE, 2021), 14,5% a mais em relação ao ano de 2010. Dentro desse consumo, o setor residencial representa 31,2% do total, ficando atrás apenas do industrial.

Para famílias de baixa renda, o consumo de energia pode ser ainda maior do que o necessário, por conta de projetos de Habitação de Interesse Social (HIS) que priorizam a quantidade à qualidade. Em estudo da WRI Brasil (2017), foi simulado 13 medidas de eficiência energética aplicadas em projetos do Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV), e constataram que, tanto para moradias unifamiliares quanto para multifamiliares, o potencial de redução médio no consumo de energia elétrica é de 18,9%.

Dalbem et. al. (2019) realizaram simulações otimizadas numa planta base do PMCMV, utilizando estratégias da *Passive House*. O estudo envolveu três cidades do sul do Brasil, onde as temperaturas são mais baixas, e foram analisadas espessuras de isolamento térmico para superfícies opacas e vidros simples, de controle solar e insulado. O trabalho revelou reduções no consumo energético, mas as soluções de projeto que se destacaram

e a economia obtida foram diferentes para cada localidade.

Alguns trabalhos já relacionam a utilização do vidro, com diferentes propriedades e áreas de janela, com o seu desempenho em latitudes e climas variados (WESTPHAL, 2019; PINTO, WESTPHAL, 2019). Porém, esses estudos foram realizados, em sua maioria, em plantas padrões de edifícios de escritórios, que possuem maior área envidraçada e padrão de ocupação diferente do uso residencial.

Dessa forma, o presente artigo possui como objetivo analisar e comparar o desempenho de vidros com diferentes propriedades térmicas quanto à redução do consumo energético em HIS, focado em condicionamento de ar, para locais com latitudes distintas.

### Simulação

Para esse estudo, três cidades brasileiras foram selecionadas, Belém, São Paulo e Florianópolis, localizadas nas latitudes -1, -23 e -27, respectivamente. A escolha das cidades se deu pelo fator climático distinto entre elas. Belém possui alta temperatura anual e alta umidade, com picos de umidade no verão, conforme mostra a Figura 01.

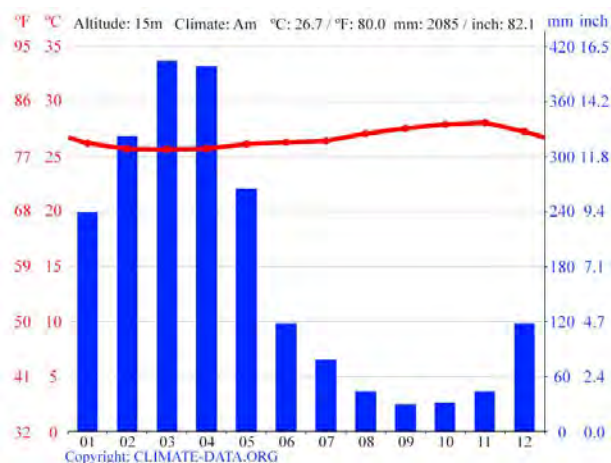


Figura 01: Gráfico de Temperatura e Umidade da cidade de Belém – PA

São Paulo possui uma variação de temperatura maior durante as estações do ano. O verão com altas temperaturas e alta umidade, e o inverso ocorrendo durante o inverno (Figura 02).

Florianópolis apresenta uma variação de temperatura próxima de São Paulo, contudo a umidade é presente durante todo o ano, possuindo também um verão ligeiramente mais quente (Figura 03).

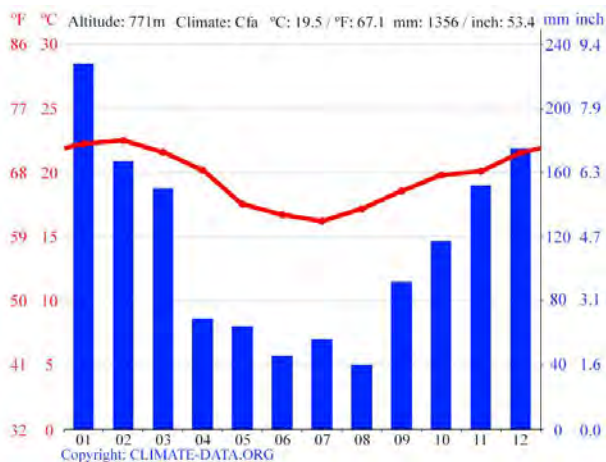


Figura 02: Gráfico de Temperatura e Umidade de São Paulo – SP



Figura 03: Gráfico de Temperatura e Umidade de Florianópolis – SC

A análise foi realizada através de simulação com *plugin Climate Studio*, da empresa *Solemma*. A modelagem da HIS foi feita no programa *Rhinoceros 7.0*, conforme as diretrizes de simulação apresentadas na documentação do *plugin*.

A planta utilizada para desenvolver a modelagem foi um modelo Minha Casa Minha Vida (MCMV) multifamiliar padrão, cada unidade possuindo aproximadamente 50m<sup>2</sup>, conforme a Figura 04.

O modelo virtual considerou o volume principal do apartamento com suas aberturas, a fachada dos quartos voltada para o norte e todas as outras como adiabáticas. Optou-se por utilizar modelos de sombreamento para a sacada, pois as lajes acabam por se portar como *brises*

horizontais e a parede divisória como um *brise* vertical (Figura 05).



Figura 04: Apartamento Padrão MCMV<sup>1</sup>

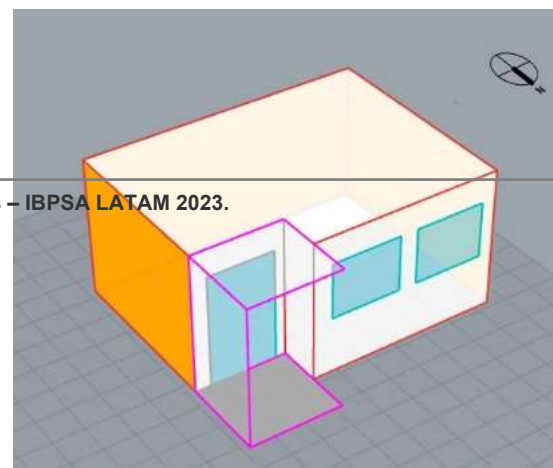


Figura 05: Modelo 3D

A simulação foi realizada considerando a localização da unidade no sétimo andar do prédio. Além disso, as características das vedações opacas foram mantidas em todas as situações analisadas, a fim de comparar apenas os vidros utilizados.

Com relação aos parâmetros energéticos do modelo, foi estabelecido que as luzes seriam acesas em um padrão residencial, com predominância nos horários noturnos e finais de semana. Já para o condicionamento de ar, utilização em todos os dias do ano, com set point de 23°C e janelas fechadas. Não foi considerado aquecimento residencial ou de água, já que o foco do estudo é a refrigeração.

Para simulação e análise, foram selecionados 06 tipos de vidro: dois simples, dois de controle solar e dois insulados. Os fatores solares (FS) e a transmitância térmica (*U-value*) de cada vidro estão informados na Tabela 01. Os vidros foram obtidos pela biblioteca internacional do *software Climate Studio*.

<sup>1</sup> Disponível em: [https://www.vlconstrutora.com.br/imoveis/residencial-vila-da-](https://www.vlconstrutora.com.br/imoveis/residencial-vila-da-mata-sao-lourenco-pe-minha-casa-minha-vida-apartamento-2quartos/)

[mata-sao-lourenco-pe-minha-casa-minha-vida-apartamento-2quartos/](https://www.vlconstrutora.com.br/imoveis/residencial-vila-da-mata-sao-lourenco-pe-minha-casa-minha-vida-apartamento-2quartos/)

Tabela 1: Vidros utilizados no processo de simulação

Vidros		FS	U-value [W/m².K]
Simples	Float (Clear)	0.82	5.82
	Solexia (verde)	0.62	5.82
Controle Solar	SolarGrey	0.58	5.82
	Solarban 72 on Starphire	0.31	3.16
Insulados	Solarban 67 - Clear	0.29	1.66
	Optiblu – Solarban 60	0.38	1.66

**Discussão e Análise dos Resultados**

A situação base para comparação do consumo energético por condicionamento do ar foi o desempenho do vidro simples *Float (Clear)*. A partir das simulações das três cidades, foi possível identificar economias energéticas variadas para cada latitude com a aplicação dos vidros selecionados, conforme suas propriedades térmicas. A redução no consumo de energia nesse estudo é unicamente representada pelo uso de ar condicionado, ou seja, pela variação da carga térmica, já que os gastos com iluminação e equipamentos elétricos se mantiveram estáveis durante a simulação conforme o padrão de consumo utilizado.

A seguir, serão apresentados os desempenhos dos vidros simulados quanto ao consumo energético total em kWh, para as três cidades trabalhadas.

**Belém**

A Figura 06 apresenta o desempenho dos diferentes vidros simulados, para a cidade de Belém. A utilização do vidro *Solexia (verde)* já resultou numa economia de energia associada ao ar condicionado de 7% em relação ao vidro *Float (Clear)*, por conta da redução do fator solar (FS). O vidro de controle solar *Solar Grey* obteve economia de apenas quatro pontos percentuais superior ao vidro verde, apesar da significativa redução do fator solar e da transmitância térmica.

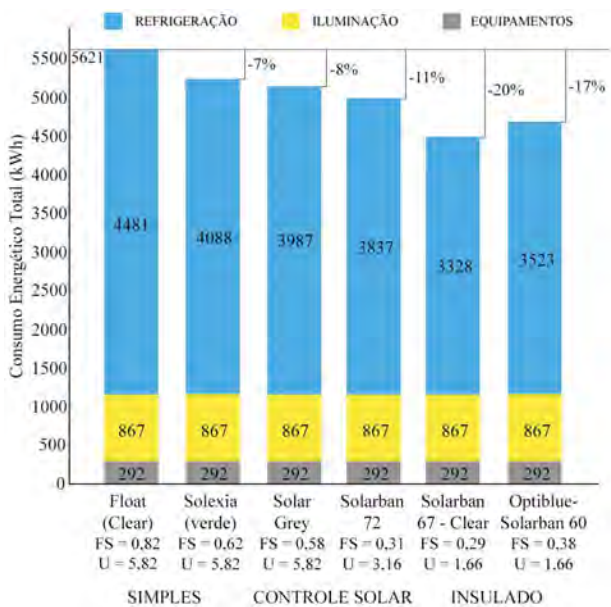


Figura 6: Resultados de Belém

Com a aplicação dos vidros insulados, a redução da carga térmica foi de 17% e 20% em relação à situação base, a maior economia no menor fator solar.

Entre os vidros simulados, o que resultou a menor carga térmica foi o vidro insulado *Solarban 67-Clear*, conjunto que possui a menor transmitância térmica e fator solar.

**Florianópolis**

Na capital catarinense, a utilização do vidro verde já garantiu 13% na redução da carga térmica em relação ao vidro *Float (Clear)*, conforme mostra o gráfico da Figura 07, quase o dobro em pontos percentuais da mesma situação em Belém. Com os vidros de controle solar, a economia aumenta conforme o fator solar diminui.

Esperava-se que, com a diferença entre as propriedades dos vidros *SolarGrey* e *Solarban 72*, com redução tanto do fator solar quanto da transmitância térmica, a economia fosse maior do que dois pontos percentuais, levando em conta o desempenho superior do vidro *SolarGrey* em relação ao *Solexia*. Tal fato pode indicar que a redução da transmitância térmica do vidro não é o fator determinante para a redução da carga térmica nessa latitude analisada.

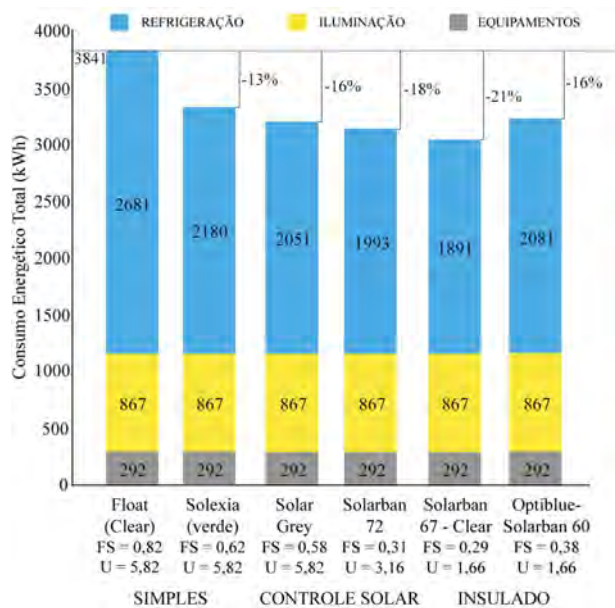


Figura 7: Resultados de Florianópolis

A menor carga térmica foi registrada com o uso do vidro insulado *Solarban 67-Clear*, uma redução de 21% em relação a situação base, e 3% em relação ao vidro de controle solar de melhor desempenho. Do conjunto, esse é o vidro de menor FS.

É importante notar que o desempenho do vidro insulado *Optiblu-Solarban 60* foi igual ao do vidro de controle solar *SolarGrey*, apesar de possui menor FS e U-value. Isso sugere que o fator solar do vidro, nessa situação, exerce maior influência na redução do consumo de refrigeração do que o fato de ele ser insulado. Essa análise é fundamental para as etapas iniciais do projeto

residencial, principalmente para os casos de HIS, visto que vidros insulados possuem custos mais elevados.

### São Paulo

Para a cidade de São Paulo, o vidro verde apresentou 14% de redução no consumo com refrigeração em comparação ao vidro *Float (Clear)* (Figura 08), o dobro em relação à mesma situação na cidade de Belém.

De todos os vidros simulados para essa localidade, o que possuiu melhor desempenho foi o de controle solar *Solarban 72*, com FS de 0,31. Assim como no caso de Florianópolis, a simulação dos dois vidros de controle solar resultou em reduções de carga térmica de apenas dois pontos percentuais de distância, apesar da diferença do fator solar de cada um.

O resultado com menor economia foi o do vidro insulado *Optiblue-Solarban 60*, com uma redução de 10% do consumo energético do ar condicionado em relação ao vidro simples, menor que a situação com o vidro *Solexia* (verde). O outro vidro insulado simulado, o *Solarban 67-Clear*, apresentou desempenho muito próximo aos vidros de controle solar, o que não justificaria a sua utilização por conta do seu valor mais elevado.

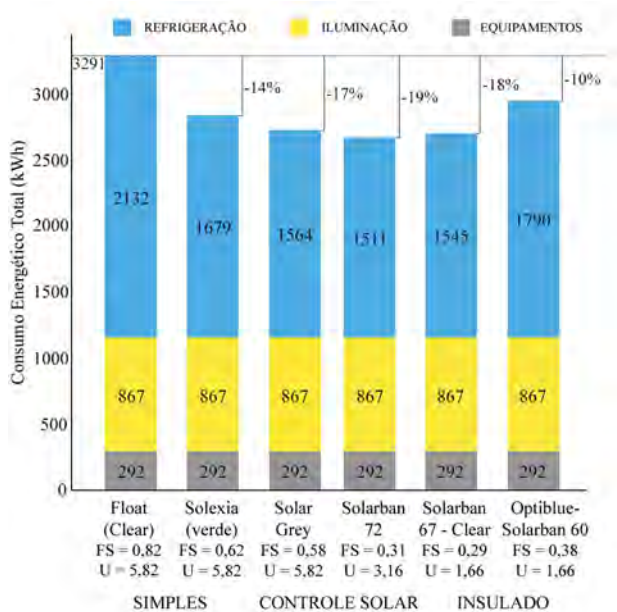


Figura 8: Resultados de São Paulo

### Conclusão

Para além das comparações dos vidros simulados, é importante ressaltar a diferença do consumo energético para refrigeração de cada cidade. Enquanto São Paulo e Florianópolis possuíram consumo de refrigeração na casa dos 2000 kWh/ano, Belém registrou em torno de 4400 kWh/ano na situação base. Isso já caracteriza a grande diferença climática entre as latitudes, e influencia no desempenho térmico de cada vidro.

Com os resultados obtidos é possível visualizar os diferentes impactos que as propriedades do vidro escolhido podem gerar no ambiente construído, para cada

latitude. Uma cidade mais quente e úmida como Belém, no extremo norte do país, se beneficia com a utilização de vidros insulados, que possuem menor transmitância térmica, e sua implementação é justificada devido à grande economia com a utilização do ar condicionado.

Cidades como Florianópolis e São Paulo, no sul e sudeste do país, apresentam um debate de utilização. Vidros insulados que resultaram numa boa redução da carga térmica, possuíram desempenhos semelhantes aos vidros de controle solar, o que não fundamentaria sua utilização por conta do maior valor de custo. Ainda, em Florianópolis, foi possível observar que a economia de energia para refrigeração está diretamente ligada à redução do fator solar do vidro, propriedade que pode ser moderada com a aplicação de vidros de controle solar.

Esse estudo também mostrou o bom desempenho do vidro verde (*Solexia*) nas cidades de São Paulo e Florianópolis. Apesar de não ter sido o vidro a registrar maior economia entre os simulados, houve redução significativa da carga térmica em relação ao vidro simples (*Float*). Aliado às vantagens econômicas, por possuir menor custo no mercado, esse resultado positivo pode corroborar com a escolha desse tipo de vidro em HIS.

Portanto, cada caso deve ser estudado em particular, visando sempre o melhor custo/benefício para a utilização do vidro, principalmente se tratando de uma habitação social, onde o custo de construção necessita ser reduzido para que o valor impacte ao mínimo o consumidor final.

### Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelas bolsas de estudo fornecidas aos autores, o que viabilizou a realização desta pesquisa.

### Referências

- DALBEM, Renata et al, Optimisation of a social housing for south of Brazil: From basic performance standard to passive house concept, *Energy*, v. 167, p. 1278–1296, 2019.
- EPE, Empresa de Pesquisa Energética. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2021: Ano Base 2020. [Rio de Janeiro], 2021. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publica5c-ao-160/topico-168/EPEFactSheetAnuario2021.pdf>>. Acesso em: 20 maio 2022.
- IEA, International Energy Agency. Key World Energy Statistics 2021. [s.l.: s.n.], 2021. Disponível em: <<https://iea.blob.core.windows.net/assets/52f66a88-0b63-4ad2-94a5-29d36e864b82/KeyWorldEnergyStatistics2021.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2022.
- PINTO, Mônica Martins; WESTPHAL, Fernando Simon, Energy Performance of Offices Buildings in Brazil using Insulated Glass Units, In: INTERNATIONAL BUILDING PERFORMANCE SIMULATION



ASSOCIATION, XVI, 2019, Rome. ANAIS [...] Italy: [s.n.] 2019, p. 4944–4951.

WESTPHAL, Fernando Simon, Avaliação de Desempenho Térmico de Fachadas com Vidros de Controle Solar em um Edifício de Escritórios, In: TECNOLOGIA DE PROCESSOS E SISTEMAS CONSTRUTIVOS, II, 2019, São Paulo. ANAIS [...]. São Paulo: IPT, 2021, p. 1-5.

WRI BRASIL, World Resources Institute. Sustentabilidade em Habitação de Interesse Social: benefícios e custos de medidas para eficiência no consumo de água e energia. São Paulo, 2017.

Disponível em:  
<[https://wribrasil.org.br/sites/default/files/Sustentabilidade-em-Habitacao-de-Interesse-Social\\_mar18.pdf](https://wribrasil.org.br/sites/default/files/Sustentabilidade-em-Habitacao-de-Interesse-Social_mar18.pdf)>. Acesso em: 20 maio 2022.

## Análise do desempenho térmico de envoltória com PCM em climas tropicais

Tássio Luiz dos Santos<sup>1</sup>, Arthur Santos Silva<sup>2</sup>, Diogo Duarte dos Reis<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>FAENG - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, Brasil

<sup>3</sup>INFI - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, Brasil

### Resumo

As edificações consomem mais da metade da energia produzida no Brasil, sendo uma boa parte deste consumo direcionado ao conforto térmico dos usuários da edificação. Entende-se que o resfriamento passivo, para o caso de climas tropicais, possa contribuir para a redução do consumo de energia. Nesse sentido, tecnologias nas envoltórias são uma solução para contribuir no resfriamento passivo e o material de mudança de fase (PCM) já é difundido em regiões de climas frios, porém pouco investigado para climas tropicais. O objetivo deste trabalho é analisar o desempenho do PCM em parte dos climas brasileiros, com base em simulações termoenergéticas utilizando o programa EnergyPlus™. Foram realizadas simulações paramétricas, considerando dois sistemas construtivos nas envoltórias, paredes leves e paredes pesadas. Os resultados do trabalho mostraram que o PCM pode influenciar diretamente na redução da carga térmica do ambiente. Variáveis como ponto de fusão, espessura do PCM e tipo de envoltória, podem contribuir para a redução do consumo de energia para atender o conforto térmico dos usuários da edificação.

### Introdução

A maior parte da energia produzida no Brasil é consumida por edificações (EPE, 2021) e, desse consumo, mais de um terço é direcionado para o funcionamento do sistema de condicionamento de ar (EPE, 2018) o qual, em climas tropicais, tem grande influência no consumo energético da edificação. O conforto térmico de edificações está relacionado diretamente com o desempenho térmico destas (Santos *et al.*, 2020), sendo assim, estratégias passivas podem influenciar diretamente no conforto térmico dos ocupantes da edificação e no consumo de energia elétrica.

O desempenho térmico da edificação é baseado nas características dos seus sistemas e, dentre os sistemas, a envoltória tem grande influência nos indicadores térmicos e de conforto da edificação (Mirrahimi *et al.*, 2016). Deste modo, desenvolver tecnologias para envoltórias, que possam melhorar seu desempenho térmico, pode contribuir para o conforto térmico dos ocupantes de forma passiva.

Tecnologias com capacidade de aumentar a inércia térmica da edificação, como o material de mudança de fase (PCM – Phase Change Material), são cada vez mais

implementadas na construção civil em países desenvolvidos. Este material contribui para o aumento do calor latente das envoltórias (Socaciu *et al.*, 2014), sendo capaz de absorver energia térmica sem o aumento na temperatura, em uma das fases do material, alternando calor sensível com calor latente, possibilitando o armazenamento temporário da energia térmica.

O PCM já é um material utilizado em edificações em clima frio e temperado pois, de forma passiva, contribui para a redução do consumo de energia de aquecimento das edificações (Socaciu *et al.*, 2014). Para os casos de edificações em climas mais quentes, o PCM pode contribuir para o conforto térmico quando o ponto de fusão do material utilizado é maior (Lei *et al.*, 2016). A temperatura de fusão do material e sua espessura influenciam diretamente no desempenho térmico das envoltórias (Solgi *et al.*, 2019), e a temperatura operativa do PCM tem relação direta com a variação climática (Beltran *et al.*, 2017). Outra variável importante é a localização espacial do material nas paredes, quanto mais interna a camada do PCM estiver, maior é o desempenho do material em climas frios (Kishore *et al.*, 2021). A simulação computacional contribui para uma avaliação mais ampla dos parâmetros ideais do PCM (Ferster *et al.*, 2017), como entender sua melhor posição espacial, a melhor temperatura de fusão para o clima local, bem como a melhor espessura a ser utilizada.

Estudos feitos por Tabares-Velasco *et al.* (2012) contribuíram para validar o modelo de PCM do programa EnergyPlus (versão 7.1). Os estudos mostraram que algumas configurações são primordiais para a análise de edificações com envoltórias com PCM, como utilizar Timestep de 3 min; quanto maior a histerese do material, menor é a precisão dos resultados obtidos; o algoritmo de transferência de calor padrão para as paredes opacas com PCM deve ser o ConDFD.

Como citado anteriormente o PCM já é um material utilizado em climas frios; contudo, estudos demonstram que o material pode contribuir também para a redução do consumo de energia de resfriamento em 21 a 32% (Lei *et al.*, 2016). Porém, este desempenho está relacionado com a temperatura de fusão do PCM e o clima local e a sua localização nas camadas mais externas das envoltórias. Para entender o comportamento do material em climas tropicais é fundamental fomentar estudos, pois estes são menos comuns atualmente (Jurizat e Wonorahardjo, 2018). Oliveira *et al.* (2021) destacam lacunas nos estudos

em sua revisão bibliográfica sistemática, como associação de paredes leves, pontes térmicas, conforto térmico entre outros. Baseado nas problemáticas já citadas, este trabalho tem o objetivo de analisar o desempenho do PCM nas regiões brasileiras, considerando diferentes parâmetros deste material.

### Materiais e métodos

As simulações deste trabalho foram feitas com o programa EnergyPlus™ v. 9.5.0. O método apresentará as condições de contorno da edificação, geometria, características dos materiais adotados e por fim a configuração das simulações.

### Climas do estudo de caso e geometria

O projeto foi simulado para seis capitais brasileiras, contemplando três regiões do país: Sul, Suldeste e Centro-Oeste. A Tabela 1 apresenta todas as cidades e algumas de suas características geográficas.

Tabela 1: cidades e suas localizações geográficas

Cidade	Lat (graus)	Long (graus)	Fuso hor.	Elev (m)	ZB
Campo Grande	-22,44	-54,65	-4	530	6
Curitiba	-15,65	-56,1	-4	182	1
Cuiabá	-25,52	-49,18	-3	910	7
Florianópolis	-27,67	-48,55	-3	7	3
Porto Alegre	-30,03	-51,23	-3	47	3
São Paulo	-23,85	-46,64	-3	792	3

A geometria da edificação é de uma residência unifamiliar com área de 41,87 m<sup>2</sup>, dividida em dois quartos, um banheiro, cozinha e sala. O layout e a projeção da geometria em perspectiva são apresentados na Figura 1.

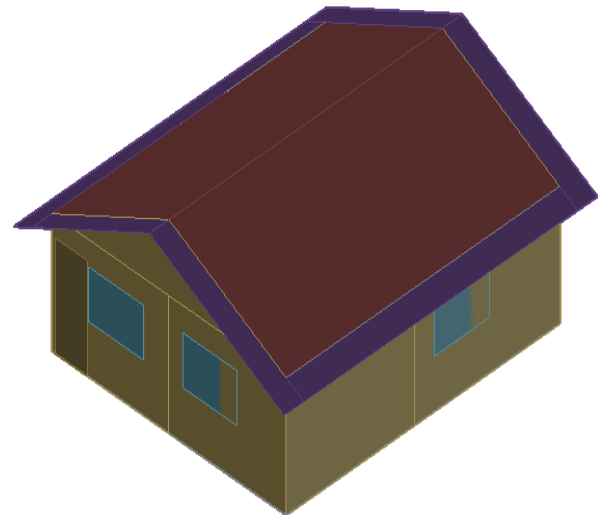


Figura 1: layout e imagem da geometria

### Características do PCM

O PCM adotado nas simulações foram os BioPCMTM da fabricante *Phase Change Energy Solutions Company*. Foram adotadas 5 temperaturas de fusão: 21°C (Q21), 23°C (Q23), 25°C (Q25), 27°C (Q27), 29°C (Q29). A Figura 2 apresenta as funções de entalpia dos PCM, baseado no modelo de Feustel. A condutividade é de 0,22 W/m.K e o calor latente varia entre 190 e 200 kJ/kg. Para o experimento, as espessuras do PCM variaram entre 1 e 2 cm.

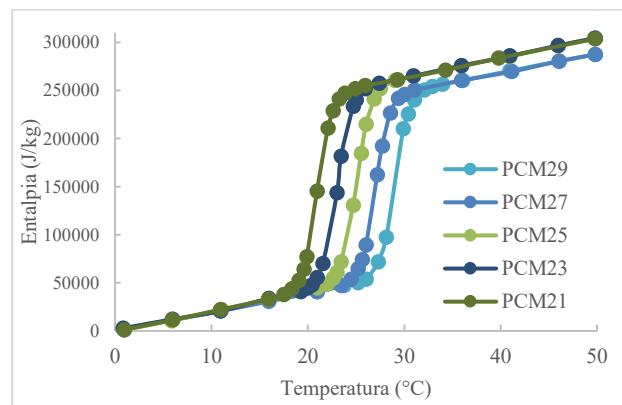
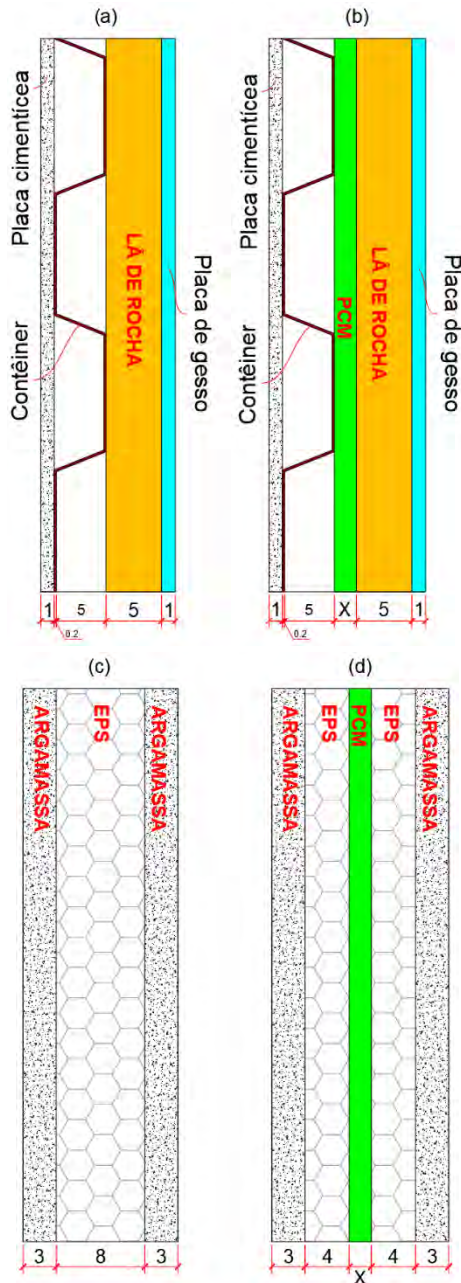


Figura 2: funções de entalpia dos PCM

Para esta análise foram considerados dois tipos de envoltória, o sistema conhecido como *Structural Concrete Insulated Panels (SCIP)*, conhecido no Brasil como Parede de Concreto e EPS, representando as paredes pesadas. O outro sistema adotado foram as paredes de contêiner, o que representou as paredes leves Figura 3.



(a) parede de contêiner sem PCM; (b) parede de contêiner com PCM; (c) parede EPS sem PCM; (d) parede EPS com PCM. Nota: medidas em centímetros

Figura 3: representação das paredes

As características dos materiais das envoltórias, que foram inseridas no programa, são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: dados dos materiais da envoltória

Material	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/m.K)	C (kJ/kg.K)
Argamassa	2000	1,150	1,00
Aço	7800	55,00	0,46
EPS	350	0,04	1,42
Gesso	1300	0,500	0,84
Lã de rocha	90	0,045	0,75

$\rho$ = massa específica;  $\lambda$ = condutividade térmica; c= calor específico

### Configuração das simulações

A configuração do funcionamento do PCM foi feita no objeto “MaterialProperty:PhaseChange”; contudo, foi utilizado um “timestep” igual a 20 e o algoritmo de condução por diferenças finitas (CondFD), permitindo simular a condutividade térmica de maneira dependente da variação de temperatura do PCM (Saffari *et al.*, 2017). O solo foi processado pelo objeto “GroundDomain”.

O sistema de ar-condicionado (HVAC) foi configurado no objeto “HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem”. O sistema de resfriamento foi configurado para funcionar baseado em um termostato de 24 °C, sempre ligando o sistema quando a temperatura superasse esse valor e houvesse ocupante nos ambientes, durante o ano inteiro. Já o sistema de aquecimento foi configurado para funcionar apenas durante o inverno (de 21/6 a 21/9), quando o termostato atingisse 18 °C e o ambiente estivesse ocupado.

Os ganhos internos considerados no trabalho foram os ocupantes, o sistema de iluminação e os equipamentos. Todos esses ganhos internos foram configurados baseado no procedimento de simulação estabelecido pelo RTQ-R INMETRO (2012), tanto seus *schedules* quanto sua carga térmica.

Para gerenciar as variações nas simulações, foi utilizado o objeto “Parametric:SetValueForRun”. Foram definidos dois modelos computacionais, de acordo com o tipo de envoltória, leves ou pesadas, e as variações de parâmetros são feitas para cada um dos arquivos climáticos, totalizando então 132 simulações, a Tabela 3 apresenta os parâmetros variados. Destaca-se que para cada tipo de PCM e parede foi feita a simulação sem PCM, para se comparar os resultados.

Tabela 3: variação das simulações

Variável	Unidade	Níveis
Arquivo climático	-	Cuiabá; Campo Grande; Curitiba; Florianópolis, Porto Alegre; São Paulo. [6]
PCM (temperatura de fusão)	°C	21; 23; 25; 27; 29. [5]
Tipo de parede	-	SCIP; Contêiner. [2]
Espessura PCM	Cm	1; 2. [2]
Para cada cidade [6]; tipo de parede [2]; foram simulados casos sem PCM [12], para fazer a comparação dos indicadores de desempenho.		

Para analisar os resultados foram utilizados como indicadores a carga térmica de resfriamento e a carga térmica de aquecimento (CTresf. e CTAqu., respectivamente), representando a soma da energia térmica necessária para resfriamento ou aquecimento

anual de todos os ambientes, determinado assim o indicador CT de cada simulação, conforme a Equação (1).

$$CT = \sum_0^{8760} CH_i \quad (1)$$

Sendo  $CH_i$  a carga térmica horária.

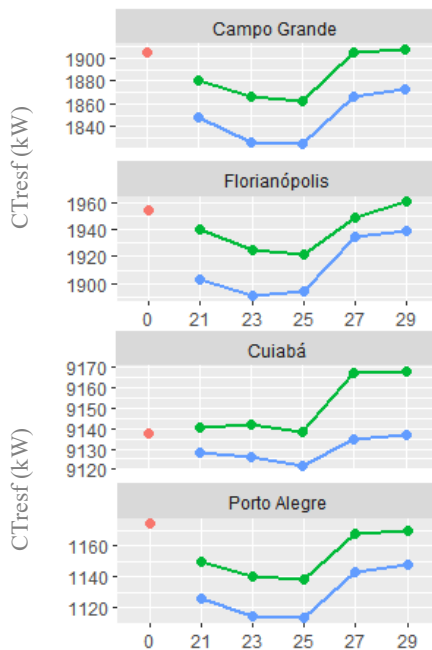
As simulações foram feitas considerando o arquivo climático de cada cidade, para as 8760 horas do ano, para todos os ambientes de permanência prolongada: Quarto 1 (Z2); Quarto 2 (Z3); e Sala (Z4). A carga térmica de cada modelo foi definida considerando a somatória da carga térmica cada ambiente de permanência prolongada. Foi elaborado um *script* em R-Studio para fazer a coleta dos resultados e plotagem dos gráficos.

### Resultados

Os resultados foram divididos em duas partes, a primeira apresenta os resultados das paredes leves, que são as paredes no sistema de contêiner, cargas térmicas de resfriamento e respectivamente aquecimento. A segunda parte dos resultados apresenta os casos das paredes no sistema SCIP, cargas térmicas de resfriamento e aquecimento.

#### Paredes leves – Contêiner

A Figura 4 apresenta os resultados das simulações das paredes leves e suas cargas térmicas de resfriamento. Levando em consideração de que quanto menor a carga térmica melhor é o desempenho do modelo, temos que a maior parte dos casos com PCM tiveram melhor desempenho do que o caso sem PCM, com exceção do caso de Cuiabá, na espessura de 1 cm.



Continuação da figura 4...

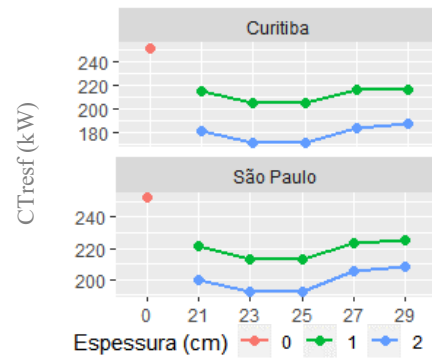


Figura 4: carga térmica de resfriamento - contêiner

A Figura 5 apresenta os resultados das cargas de aquecimento, ainda nos casos das paredes leves. Com exceção da cidade de Cuiabá, que possui um clima quente, todas as amostras com PCM tiveram um resultado melhor que os casos sem PCM, tendo em vista que o seu consumo de energia para aquecimento é menor.

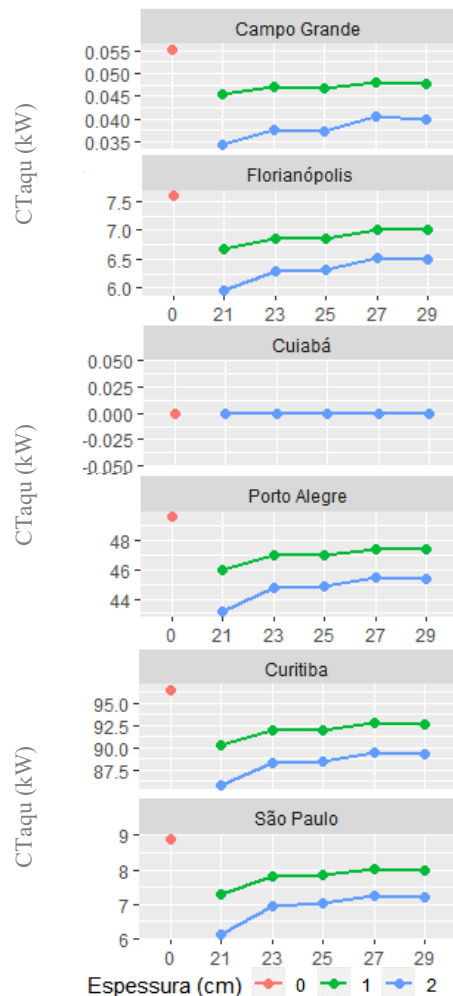


Figura 5: carga térmica de aquecimento – contêiner

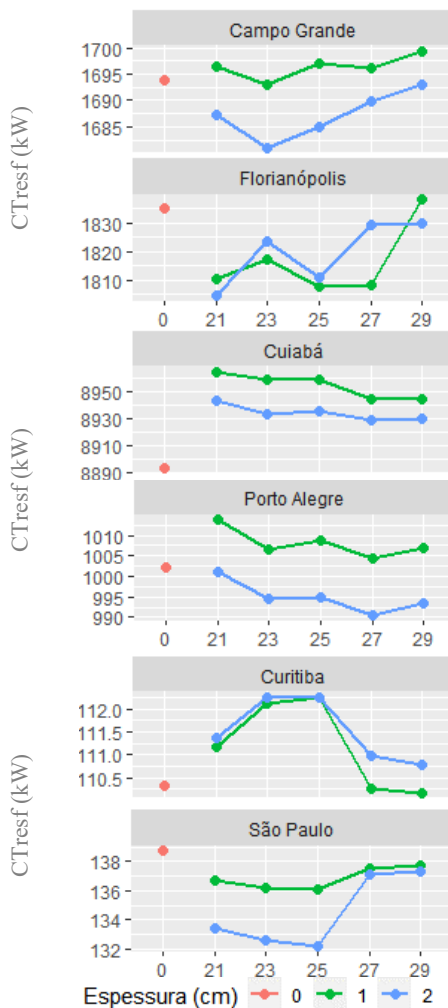
Destaca-se que para todos os resultados das paredes leves, seja resfriamento ou aquecimento, os casos com PCM na

espessura de 2 cm demonstram um melhor desempenho térmico. Sendo assim entende-se que a utilização do PCM nesse caso pode contribuir para a redução do consumo de energia para o sistema de condicionamento de ar da edificação.

Analisando a temperatura de fusão, percebe-se que os casos com PCM na temperatura de fusão entre 23 e 25 °C tiveram os melhores resultados, em todos os climas analisados, no caso de carga de resfriamento. Já os casos de carga de aquecimento, as temperaturas de fusão entre 21 e 23 tiveram os melhores resultados.

**Paredes pesadas – SCIP**

A Figura 6 apresenta os resultados das cargas de resfriamento. O comportamento dos resultados das paredes pesadas foi diferente das paredes leves, tendo em vista que ocorreram mais situações em que o modelo sem PCM teve menor carga de resfriamento/aquecimento. Diante dos resultados destacamos a cidade de São Paulo, onde todos os casos com PCM tiveram melhor desempenho com os casos referência.



Os resultados de carga de aquecimento são apresentados na Figura 7. Os casos das cidades de Cuiabá e Campo Grande, as regiões de climas mais quentes, apresentaram resultados zerados. Desconsiderando esses dois casos, temos que apenas um caso, da cidade de Florianópolis, a amostra com PCM teve um resultado de melhor

desempenho, quando comparado com a referência, sem PCM.

Figura 6: carga térmica de resfriamento – SCIP

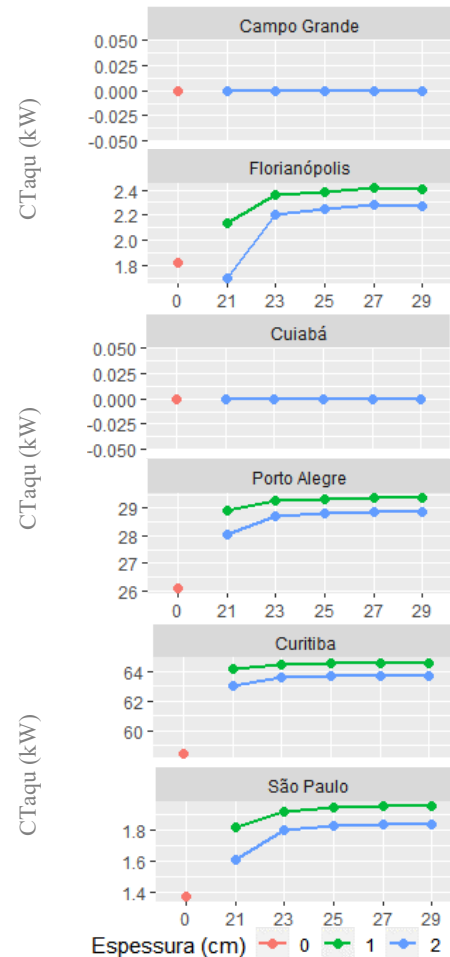


Figura 7: carga térmica de aquecimento - SCIP

**Conclusão**

O objetivo deste trabalho foi analisar o desempenho do PCM em envoltórias de edificações nas regiões brasileiras, utilizando de simulações computacionais. Os resultados apresentados mostraram que o PCM é um possível candidato para auxiliar na redução da carga térmica, e consequentemente redução no consumo de energia elétrica das edificações.

Sistemas de envoltória leves podem ter um melhor desempenho térmico quando complementados com PCM em uma de suas camadas. Os resultados também mostraram que podem existir pontos de fusão ideais para cada região, bem como variação do desempenho térmico de acordo com a espessura do PCM adotado nas paredes. A espessura da camada de PCM também é uma variável muito influente no consumo de energia para resfriamento/aquecimento.

Para as cidades de climas mais frios como Curitiba, Florianópolis e Porto Alegre, o PCM pode ser uma

tecnologia adotada para contribuir no resfriamento passivo das edificações, tendo em vista que tiveram altas variações nos resultados de carga térmica de resfriamento.

As paredes pesadas apresentaram um comportamento bem diferente das paredes leves, o que demonstra a necessidade de maior estudo do comportamento do PCM nesses casos.

### Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS/MEC – Brasil, e com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (Capes) – Código de Financiamento 001.

### Referências bibliográficas

- Beltran, D., J. Martínez-Gómez, e A. Lobato-Cordero, “Effect of environment on the selection of phase change materials for building wallboards using multi-criteria decision methods and Building Energy Simulations”, *Building Simulation Conference Proceedings*, International Building Performance Simulation Association, 1359-1369, San Francisco, USA, 7 - 9 Agosto 2017.
- Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2018), NOTA TÉCNICA EPE 030/2018 - Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética, Rio de Janeiro.
- Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2021), Balanço Energético Nacional 2021: Ano base 2020, Rio de Janeiro.
- Ferster, B., H. Shen, e J.D. Rendali, “PCM (Phase Change Material) optimization modeling for passive cooling in South Texas”, *Building Simulation Conference Proceedings*, International Building Performance Simulation Association, 958-964, San Francisco, USA, 7 - 9 Agosto 2017.
- INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. Portaria nº 18, de 16 de janeiro de 2012. Regulamento Técnico da Qualidade para a Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R). Rio de Janeiro, 2012.
- Jurizat, A., e S. Wonorahardjo, “A Review on the Application of Phase Change Material for Indoor Temperature Management in Tropical Area”, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics Publishing, 2018.
- Kishore, R.A., M.V.A. Bianchi, C. Booten, J. Vidal, e R. Jackson, “Parametric and sensitivity analysis of a PCM-integrated wall for optimal thermal load modulation in lightweight buildings”, *Applied Thermal Engineering*, v. 187, 2021.
- Lei, J., J. Yang, e E.H. Yang, “Energy performance of building envelopes integrated with phase change materials for cooling load reduction in tropical Singapore”, *Applied Energy*, v. 162 pp. 207-217, 2016.
- Mirrahimi, S., M.F. Mohamed, L.C. Haw, N.L.N. Ibrahim, W.F.M. Yusoff, e A. Aflaki, “The effect of building envelope on the thermal comfort and energy saving for high-rise buildings in hot-humid climate”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 53 (2016), pp. 1508-1519, 2016.
- Oliveira, R.B. de, T.S. Gonzales, e M.T. Marques, “USO DE PCM PARA EDIFICAÇÕES EM REGIÃO DE CLIMA QUENTE: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA”, *PARC Pesquisa Em Arquitetura e Construção*, v. 12, pp. 1-15, 2021.
- Saffari, M., A. de Gracia, C. Fernández, and L.F. Cabeza, “Simulation-based optimization of PCM melt-ing temperature to improve the energy performance in buildings”, *Applied Energy*, v. 202, pp. 420-434, 2017.
- Santos, T.L. dos, F.H.F. dos S. Porto, e A.S. Silva, “Análise da correlação entre conforto e desempenho térmico em habitações de interesse social por simulação computacional”, *Ambiente Construído*, v. 20, pp. 211-229, Mar. 2020.
- Socaciu, L., A. Pleșa, P. Ungureșan, e O. Giurgiu, “Review on phase change materials for building applications”, *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, v. 13, pp. 179-194, Jul. 2014.
- Solgi, E., Z. Hamedani, R. Fernando, B. Mohammad Kari, e H. Skates, “A parametric study of phase change material behaviour when used with night ventilation in different climatic zones”, *Building and Environment*, v. 147, pp. 327-336, 2019.
- Tabares-Velasco, P.C., C. Christensen, e M. Bianchi, “Verification and validation of EnergyPlus phase change material model for opaque wall assemblies”, *Building and Environment*, v. 54, pp. 186-196, 2012.

## Influência no desempenho termo energético de edificações ao considerar a estrutura como ponte térmica na envoltória em simulações

Igor Sartori Schlichting<sup>1</sup>, Matheus Soares Geraldi<sup>1</sup>, Ana Paula Melo<sup>1</sup>, Roberto Lamberts<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, Brasil

### Resumo

Com a recente adição de pontes térmicas nas normas brasileiras, faz-se necessário compreender o comportamento desse fenômeno nos climas do Brasil. Neste trabalho foi utilizada a NBR 15575-1 (2020) como método avaliativo do desempenho termo energético das simulações computacionais com diferentes porcentagens de pontes térmicas na envoltória, que representam a estrutura da edificação. Os resultados mostraram que, ao considerar a estrutura como pontes térmicas, há uma influência no desempenho, superestimando o desempenho em climas frios e subestimando o desempenho em climas quentes.

### Introdução

Com o desenvolvimento de *softwares* de gestão, modelagem e simulação a tecnologia e a sustentabilidade estão cada vez mais próximas na construção civil. Por exemplo, as simulações termo energéticas, que visam melhorar o desempenho das edificações.

As normas brasileiras (NBRs) já assimilaram as simulações em seus critérios de desempenho e a tendência seria aperfeiçoar estes critérios conforme a tecnologia avança e o mercado acaba sendo forçado a cumprir as demandas de desempenho.

Eli et al. (2021) realizaram um estudo de desempenho térmico em uma residência abordando o percentual de horas ocupadas dentro de uma faixa de temperatura operativa (PHFT) e a Carga Térmica Total (CgTT), sendo esta, a resultante entre a soma da carga térmica total de resfriamento (CgTR) e da Carga térmica total de aquecimento (CgTA). A análise, aplicada para o contexto brasileiro, foi feita através de simulações paramétricas com a variação de três parâmetros: construtivo (relacionado com o sistema construtivo e materiais do edifício); comportamental (associado com a forma que os ocupantes utilizam a habitação); e climático (relacionado com a localização). Os resultados mostraram que apesar de existir uma forte correlação entre os indicadores, o PHFT não deve ser considerado individualmente, pois, caso exista a utilização de condicionamento artificial, pode resultar em edifícios menos eficientes. Os autores apontaram que o comportamento e a sensibilidade às temperaturas do usuário causaram significativos impactos

para a CgTT. Além disso, o estudo mostrou que a utilização de isolamento nas paredes e telhados melhora o desempenho térmico das edificações, ou seja, quanto menor a transmitância resultante da envoltória, melhor o desempenho térmico nos climas avaliado.

Ao utilizar isolamento nas paredes e telhados, parte da envoltória do edifício passa a ter mudanças significativas na resistência térmica e, conseqüentemente, na transmitância térmica. Essa diferença na transmitância é devido a existência de diferentes materiais com diferentes propriedades térmicas na envoltória do edifício, causando as chamadas pontes térmicas (PTs). As pontes térmicas também podem ocorrer por diferença de espessura e diferença de áreas internas ou externas. (NBR ISO 10211, 2022).

O impacto das pontes térmicas é um assunto discutido há tempos em muitos países e recentemente o tema está surgindo no Brasil. A presença de pontos vulneráveis na envoltória do edifício pode influenciar a eficiência energética e higroscópica, facilitando pontos de condensação e favorecendo a proliferação de fungos. (Freitas e Cunha, 2018).

A NBR 15575-1, atualizada em 2020, utiliza o PHFT e a CgTT como forma de avaliação do desempenho térmico de edificações residenciais. Para isso, a NBR 15575-1 (2020) determina critérios que a avaliação por simulação deve seguir para atingir diferentes níveis de desempenho. As simulações necessitam de simplificações por ainda não ser viável replicar de forma eficiente todos os componentes que existem na envoltória dos edifícios, desconsiderando tubulações, estrutura e outros componentes menores que fazem parte da composição dela. Porém, a NBR 15575-1 (2020) determina que se deve considerar qualquer elemento que represente mais do que 20% do coeficiente de transferência térmica total de uma superfície, estes elementos devem ser tratados como pontes térmicas, pois representam uma mudança significativa na resistência térmica da envoltória, seja pela presença de material com condutividade térmica diferente ou espessura do material.

Dominković et al. (2018) avaliaram os modelos de diferentes arquétipos de edificações na Dinamarca, que possui clima predominantemente frio, para avaliar o seu potencial de pré-aquecimento e os subsequentes períodos de corte do fornecimento de calor. Com objetivo de



otimizar o sistema energético focando no impacto da massa térmica para armazenamento no fornecimento de energia do aquecimento urbano. Para tal, um dos indicadores utilizados para a análise foi a autonomia térmica (em inglês, *thermal autonomy*), em que foi avaliado o tempo que os ambientes ficavam expostos a temperaturas acima de 18°C, tendo funcionamento semelhante ao PHFT. Os autores constataram que edifícios com maior transmitância térmica possuíam menor potencial da autonomia térmica, mostrando os efeitos das perdas de calor do edifício para o ambiente externo. O estudo demonstrou que em todos os cenários a massa térmica para armazenamento permitiu que mais aquecimento solar térmico fosse efetivamente utilizado. Freitas e Cunha (2018) realizaram um estudo comparando três tipos diferentes de modelos energéticos, considerando ou não as pontes térmicas, para dois casos, um caso com menor transmitância e o outro com maior transmitância das paredes externas. O objetivo da pesquisa seria avaliar o conforto térmico e consumo de energia de uma residência unifamiliar, na cidade de Pelotas/RS, utilizando os dados climáticos de Camaquã/RS, que está na Zona Bioclimática 2 e pertence ao Intervalo de Temperatura Externa 1, este intervalo é a média anual da temperatura externa de bulbo seco do arquivo climático utilizado (NBR 15575-1, 2020). Os tipos de modelos considerados foram o Tipo 1: o edifício modelado considerando a forma da estrutura, considerando uma transmitância diferente entre a estrutura e as paredes do edifício, o Tipo 2: a forma simplificada que é comumente utilizada modelando o edifício considerando apenas a transmitância das paredes e o Tipo 3: que é modelado da mesma forma que o Tipo 2, porém com o acréscimo na transmitância das paredes considerando pontes térmicas através da NBR ISO 10211. Como método de mensurar o impacto das pontes térmicas, os autores utilizaram os indicadores da ASHRAE Standard 55 para conforto e as cargas térmicas de resfriamento e aquecimento, também utilizadas para o desempenho intermediário e superior da NBR 15575. O estudo demonstrou a importância de considerar as pontes térmicas devido a diferença encontrada entre os casos. Por exemplo, o Tipo 2, sem pontes térmicas, apresentou diferença de consumo de até 33% em comparação com o Tipo 3.

Theodosiou e Papadopoulos (2008) conduziram um estudo de simulação computacional com diferentes configurações de isolamento em edifícios na Grécia, com o intuito de investigar o impacto de pontes térmicas no consumo de energia. Os autores avaliaram o desempenho de paredes de tijolo duplo, que são amplamente utilizadas na Grécia, e concluíram que a forma atual de isolamento das paredes não contribui para a conservação de energia do edifício. Considerando que a maioria dos edifícios são parcialmente isolados e as pontes térmicas não são levadas em consideração, as perdas de calor podem aumentar até 35%. Até mesmo quando um sistema melhor de isolamento é utilizado a demanda para aquecimento que não considera pontes térmicas, pode ser 30% maior. Isso demonstra que a forma atual de verificação do desempenho de residências na Grécia é insuficiente e

pode levar a uma subestimação significativa na energia de consumo.

Diante do exposto, este trabalho buscou ampliar o conhecimento dos efeitos de pontes térmicas, causadas pela diferença entre materiais, em paredes externas, utilizando os critérios da NBR 15575-1 (2021) como forma de mensurar o impacto das pontes térmicas no desempenho termo energético de uma edificação residencial em diferentes climas.

O objetivo deste artigo é analisar a influência de pontes térmicas, pela definição da NBR 15575-1 (2020), no desempenho térmico de uma edificação, localizada em diferentes climas Brasileiros.

Para cumprir o objetivo proposto, fez-se a comparação do mesmo modelo de unidade habitacional nas cidades de Florianópolis, Urubici e Palmas, utilizando os indicadores da NBR 15575-1 (2020), referente ao desempenho de edificações habitacionais. E verificou-se a interferência das pontes térmicas, devido a estrutura, em uma residência térrea unifamiliar com diferentes porcentagens da parede externa com pontes térmicas.

## Método

O método utilizado neste artigo é baseado em 6 etapas. A Figura 1 apresenta um fluxograma do método.

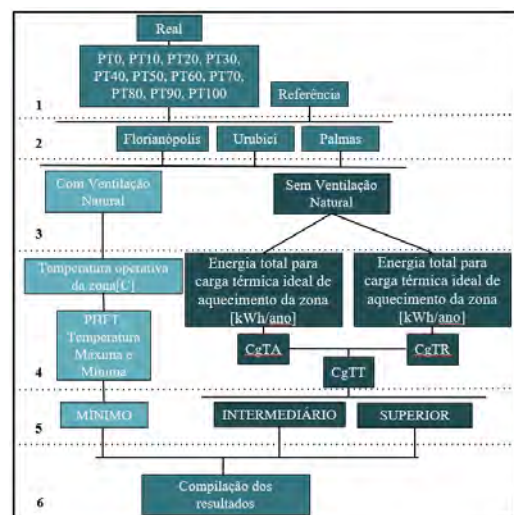


Figura 1 – Fluxograma do método.

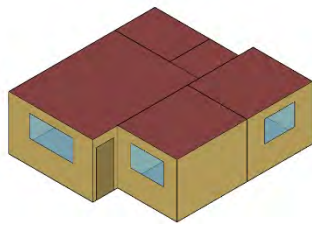
## Modelagem – 1

Foram estabelecidos 12 modelos, sendo 1 modelo representando a condição de referência e 11 modelos representando variações reais, utilizando o software *SketchUp Maker 2017* com o plugin *Euclid 9.4*.

Para analisar o impacto de diferentes quantidades de PTs em uma edificação, foram feitos modelos com diferentes proporções de pontes térmicas nas paredes externas, variando de 0% da área da parede, ou seja, sem estrutura, até 100% da área da parede composta pela estrutura.

O objeto de estudo escolhido foi baseado no caso base obtido do estudo de Triana et al. (2015), por representar uma habitação de interesse social no contexto brasileiro, com quatro ambientes, dois quartos, um banheiro e uma

cozinha/estar, totalizando 38,58 m<sup>2</sup> como mostram as Figuras 2.



(a) Geometria



(b) Esquema dos ambientes

Figura 2 – Representação do modelo base

### Definição do Clima - 2

O estudo feito por Veiga et al. (2020) mostrou que há diferenças no comportamento térmico das unidades habitacionais conforme o clima em que estão inseridas. Sendo assim, as cidades foram escolhidas com o intuito de comparar a mesma residência em uma cidade de clima predominantemente frio, um clima ameno e um clima predominantemente quente, sendo elas Urubici, Florianópolis e Palmas, respectivamente.

Para as simulações, foram utilizados os dados climáticos INMET 2018 de cada cidade, classificados de acordo com o intervalo de temperaturas externas da NBR 15575-1 (2020). Este intervalo é a média anual da temperatura externa de bulbo seco do arquivo climático utilizado, com a definição das zonas bioclimáticas de acordo com a NBR 15220-3 (2005), como mostra a Tabela 1.

Tabela 1: Média anual da temperatura de bulbo seco

Cidade	TBSm (°C)	Intervalo de temperatura s externas NBR 15575	Zona Bioclimática
Urubici	10,83	1	ZB1
Florianópolis	20,91	1	ZB3
Palmas	26,87	2	ZB7

(TBSm)

### Configuração do EnergyPlus de acordo com a NBR15575-1 - 3

Nesta etapa os modelos foram configurados no software EnergyPlus 9.3. Foram determinados os parâmetros de

entrada, como as características construtivas, os cronogramas de uso e ocupação, a localização e as características dos materiais.

A NBR 15575-1 (2020) utiliza um método de comparação entre indicadores para classificar o desempenho de uma edificação. A comparação é feita entre um modelo de referência com componentes e materiais de referência, de acordo com a NBR, e um modelo real, com a composição de materiais de acordo com o projeto desejado.

Ambos os modelos foram configurados com o mesmo padrão de ocupação determinado pela NBR 15575-1 (2020), com quartos totalmente ocupados entre 00:00 e 08:00 e entre 22:00 e 24:00 e com a sala com meia ocupação entre 14:00 e 18:00 e totalmente ocupada entre 18:00 e 22:00. Considerando 2 pessoas por quarto, totalizando 4 residentes.

Para este estudo todos os materiais e componentes do modelo real possuem as condições de referência, com exceção das paredes externas, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2: Características do Modelo

Características das Paredes externas	Valores
Parede de referência (10 cm)	Representa uma parede de concreto 10 cm U= 4,403; CT= 220
Parede modelo real (18 cm)	Reboco 2,5 cm + Isolamento EPS 4 cm + Tijolo maciço 9 cm + Reboco 2,5 cm U= 0,821; CT= 173
Ponte térmica modelo real (18 cm)	Representa uma estrutura de concreto armado 2% de armadura 18 cm U= 4,028; CT= 414

\* U = Transmitância térmica, em W/m<sup>2</sup>K.

CT = Capacidade térmica, em kJ/m<sup>2</sup>K.

As características térmicas dos materiais das paredes foram determinadas por meio da NBR 15575 e a ISO 10456, como mostra a Tabela 3.

Tabela 3: Características Térmicas dos Materiais das Paredes

Material	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Condutividade Térmica (W/m.K)	Calor Específico (J/kg.K)
Parede de Concreto	2200	1,75	1
Estrutura de Concreto	2300	2,3	1
Reboco	1800	1	1
Tijolo Maciço	1000	0,7	0,92
EPS	11	46	1,42

### Outputs e Indicadores - 4

Os indicadores utilizados neste estudo de acordo com a NBR 15575-1 (2020) são:

1. **Percentual de horas ocupadas dentro de uma faixa de temperatura operativa (PHFT):** O

PHFT é calculado para cada área de permanência prolongada (APP), com PHFT da unidade habitacional (UH) obtido a partir da média aritmética entre os valores de todos os APPs. Sendo a razão entre as horas ocupadas dentro de uma determinada faixa de temperatura operativa e o total de horas ocupadas do ambiente.

2. **Carga térmica de aquecimento (CgTA):** quantidade de calor fornecido ao ambiente para manter as condições adequadas.
3. **Carga térmica de refrigeração (CgTR):** quantidade de calor retirado do ambiente para manter as condições adequadas.
4. **Carga térmica total (CgTT):** total de calor, fornecido ou retirado do ar do ambiente para manter as condições adequadas.

Para cada modelo da UH foram feitas simulações, utilizando o programa *EnergyPlus* 9.3, com e sem ventilação natural, como mostra a Figura 2, para a coleta dos *outputs* de:

1. Temperatura operativa da zona (*Zone Operative Temperature*) [°C]
2. Energia total para carga térmica ideal de aquecimento da zona (*Zone Ideal Loads Zone Total Heating Energy*) [kWh/ano]
3. Energia total para carga térmica ideal de resfriamento da zona (*Zone Ideal Loads Zone Total Cooling Energy*) [kWh/ano]

Sendo assim, o *output* 1, Temperatura operativa da zona [°C] irá compor o indicador de PHFT, enquanto o 2, Energia total para carga térmica ideal de aquecimento da zona [kWh/ano], e o 3, Energia total para carga térmica ideal de resfriamento da zona [kWh/ano], irão compor a CgTA e a CgTR, respectivamente, com a resultante dos indicadores de carga térmica sendo a CgTT.

#### Análise dos Indicadores da NBR 15575 - 5

Para estabelecer os níveis de desempenho a NBR 15575-1 (2020) determina o aumento do PHFT real em relação ao PHFT referência e a redução do CgTT real em relação ao CgTT referência, de acordo com os critérios das Tabelas 4 e 5:

Tabela 4: Critério de avaliação de desempenho térmico da envoltória quanto ao PHFT, UH

Nível de desempenho PHFT	Critério
Mínimo	PHFT <sub>UH, real</sub> > 0,9. PHFT <sub>UH, ref</sub>
Intermediário	$\Delta\text{PHFT} \geq \Delta\text{PHFT}_{\text{mín}}$
Superior	$\Delta\text{PHFT} \geq \Delta\text{PHFT}_{\text{mín}}$

Para uma UH alcançar o nível mínimo, basta que o PHFT real, seja superior que 70% do PHFT referência, enquanto o CgTT apenas é considerado na avaliação para atingir os níveis intermediário e superior.

Porém, para atingir os níveis intermediário ou superior o incremento do PHFT deve ser maior que o incremento mínimo determinado pela NBR15575-1 para cada nível,

assim como a CgTT, que deve ser maior que a redução mínima determinada pela NBR15575-1 para cada nível.

Tabela 5: Critério de avaliação de desempenho térmico da envoltória quanto à CgTT, UH

Nível de desempenho CgTT	Critério
Mínimo	Não Considera
Intermediário	$\text{RedCgTT} \geq \text{RedCgTT}_{\text{mín}}$
Superior	$\text{RedCgTT} \geq \text{RedCgTT}_{\text{mín}}$

#### Análise dos resultados entre os casos - 6

A última etapa consistiu na compilação dos indicadores e níveis de desempenho atingidos das 11 UHs na condição real, para cada uma das 3 cidades avaliadas, totalizando 33 casos avaliados, para analisar e comparar os resultados da pesquisa.

### Resultados

#### PHFT

A classificação dos níveis atingidos para cada caso em relação ao PHFT é apresentada na Tabela 6.

Tabela 6: Carga Térmica Florianópolis

Nível NBR 15.575	% de PT	PHFT (%)		
		PHFT - Florianópolis	PHFT - Palmas	PHFT - Urubici
Insuficiente	Ref.	70.71%	33.13%	14.60%
Atende o nível Mínimo	Ref.	70.71%	33.13%	14.60%
Atende o nível Intermediário	PT0	73.03%	25.68%	19.54%
Atende o nível Superior	PT10	73.45%	29.35%	16.60%
	PT20	73.82%	30.74%	14.97%
	PT30	74.60%	34.31%	13.54%
	PT40	75.06%	37.08%	11.96%
	PT50	75.55%	39.39%	10.82%
	PT60	75.93%	40.90%	10.08%
	PT70	76.08%	41.49%	9.70%
	PT80	76.29%	42.33%	9.27%
	PT90	76.33%	44.24%	8.37%
	PT100	76.39%	44.79%	8.03%

Em Florianópolis, a UH atingiu o nível intermediário para todos os testes. Conforme a porcentagem de pontes térmicas aumentou, o PHFT também aumentou, pois quanto maior o incremento do PHFT, maior o período que a UH ficou dentro da faixa de temperatura operativa do intervalo determinado pela NBR 15575-1 (2020), como mostra a Figura 4.

A UH em Palmas (Figura 5), inicialmente, não atingiu o nível mínimo, sendo assim, não estaria de acordo com a NBR 15575. Conforme a porcentagem de pontes térmicas aumentou o PHFT também aumentou, ou seja, aumentou seu desempenho em relação a este critério, atingindo o nível mínimo quando 20% da composição das paredes eram pontes térmicas.

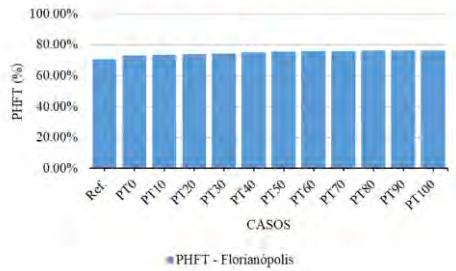


Figura 4: Gráfico comparativo do PHFT

Já a UH em Urubici (Figura 6), inicialmente, atingiu o nível mínimo, estando de acordo com a NBR 15575-1, conforme a porcentagem de pontes térmicas aumentou o PHFT reduziu. Ao alcançar 40% da composição das paredes com pontes térmicas a unidade deixou de cumprir o mínimo exigido pela NBR 15575-1

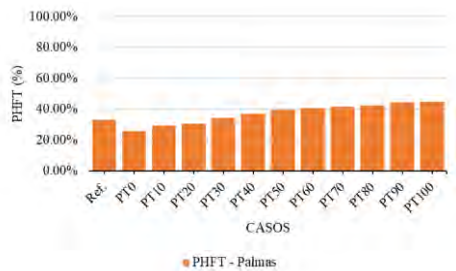


Figura 5: Gráfico comparativo do PHFT

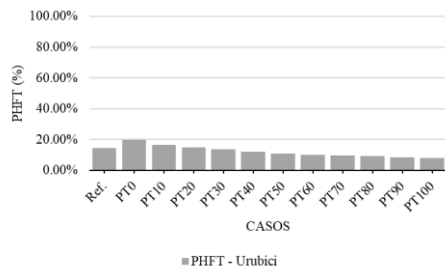


Figura 6: Gráfico comparativo do PHFT

Analisando as cidades em conjunto percebe-se que em climas amenos, como Florianópolis, e quentes, como Palmas, as pontes térmicas surtiram efeito similar. Conforme a transmitância das paredes aumentou, com a presença de componentes com maior transmitância, o PHFT também aumentou. Já Urubici aconteceu o contrário, conforme a transmitância térmica da envoltória aumentou, o PHFT reduziu, tendo o mesmo comportamento apontado por Dominković et al. (2018) para edifícios em climas predominantemente frios.

### CgTT

Em relação às cargas térmicas, percebe-se que em Florianópolis a CgTT reduziu conforme o aumento da quantidade de pontes térmicas, com redução da CgTR e aumento da CgTA, como mostra a Figura 7. Esse comportamento foi o mesmo apontado por Freitas e Cunha (2018) ao testarem diferentes níveis de transmitância em uma residência no mesmo intervalo das faixas de temperatura operativas que Florianópolis. A

análise feita pelos autores mostrou redução da CgTR e aumento da CgTA conforme a transmitância aumenta.

O estudo feito por Eli et al. (2021) alcançou resultados similares, ao observar que as envoltórias com maior transmitância obtiveram menor desempenho térmico nas cidades avaliadas. Porém, em Florianópolis, a CgTT apresentou redução, enquanto para Freitas e Cunha (2018) a CgTT aumentou consideravelmente.

Já em Urubici, a parede com maior transmitância aumenta a CgTT necessária, como mostra a Figura 8. No caso de Urubici tanto a CgTA como a CgTT seguiram o mesmo padrão de aumentar conforme a transmitância das paredes externas aumenta, assim como foi apresentado por Freitas e Cunha (2018) ao analisar Camaquã.

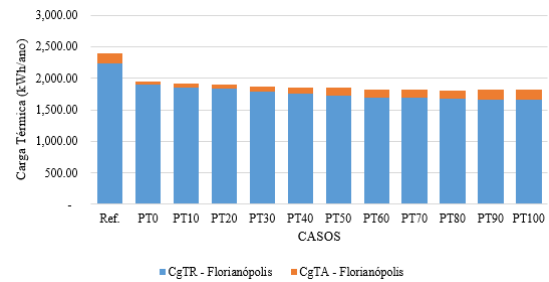


Figura 7: Carga Térmica Florianópolis

Observa-se então que Urubici e Camaquã, que pertencem às zonas bioclimáticas 1 e 2, respectivamente, tiveram o mesmo comportamento em relação às cargas térmicas, enquanto Florianópolis, que pertence a zona bioclimática 3, também teve aumento da CgTA. Porém, como a redução na CgTR foi superior, houve compensação do resultado final para redução do CgTT. Isso mostra que apesar destas três cidades estarem no mesmo intervalo 1 de temperaturas externas, as UHs não apresentam o mesmo comportamento em relação às cargas térmicas pela diferença de zonas bioclimáticas entre elas.

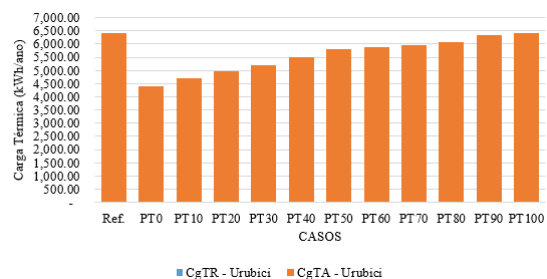


Figura 8: Carga Térmica Urubici

Os casos na cidade de Palmas apenas possuem CgTR, pois o ambiente externo é muito quente para necessitar de aquecimento, sendo que o acréscimo gradual da transmitância devido à mudança de porcentagem de pontes térmicas acarretou na redução da CgTT necessária. As pontes térmicas e o aumento da transmitância tiveram influência similar à Florianópolis referente ao PHFT e a CgTT, como mostra a Figura 9.

Tanto Fraga e Cunha (2018) como Eli et al. (2021) chegaram à conclusão que aumentar a transmitância da envoltória reduz o desempenho térmico dos edifícios, mas

ambas as pesquisas foram feitas em cidades pertencentes ao intervalo 1 de temperaturas externas da NBR 15575-1. O mesmo foi apresentado por Theodosiou e Papadopoulos (2008) na Grécia.

Palmas, que pertence ao intervalo 2 de temperaturas externas, apresentou aumento no desempenho ao aumentar a transmitância das paredes externas, reforçando que as pontes térmicas irão influenciar de forma distinta edifícios com climas quentes ou frios.

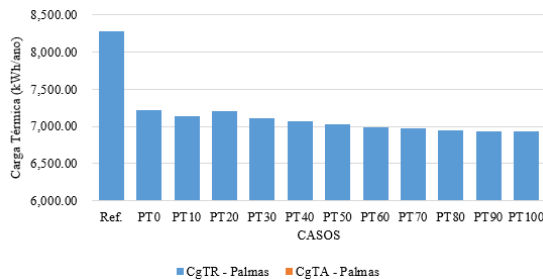


Figura 9: Carga Térmica Palmas

## Conclusão

Este estudo demonstrou a influência das pontes térmicas, causadas pela estrutura, nas simulações de desempenho térmico de uma residência unifamiliar, utilizando de 36 modelos de simulação computacional que representam combinações paramétricas com variação de clima e proporção de pontes térmicas nas paredes externas. Utilizou-se os indicadores de PHFT e CgTT, da NBR 15575-1 (2020) para avaliar o desempenho da edificação. Percebe-se que as estruturas podem impactar no desempenho térmico de edificações de diferentes formas. Em relação ao PHFT, as variações de porcentagem apresentadas são suficientes para alterar o desempenho de edificações, tanto para aumentar ou reduzir o desempenho, dependendo do clima do local e da transmitância das paredes.

Os resultados de CgTT mostram que os locais com climas mais quentes, como Palmas e Florianópolis, apresentam maior desempenho conforme o aumento da porcentagem de pontes térmicas. Já para Urubici (clima predominantemente frio) houve maior desempenho com menos pontes térmicas, ou seja, com menores transmitâncias das paredes.

Conclui-se que considerar a estrutura no modelo computacional, impactará de forma relevante o desempenho térmico das edificações. Sendo que os modelos, ao não considerarem as pontes térmicas, podem subdimensionar o desempenho térmico em climas quentes ou superdimensionar em climas frios.

Para estudos futuros, destaca-se a importância de se explorar climas mais quentes como Palmas, pois poucos estudos abordam o efeito das pontes térmicas nesses climas. Além disso, é importante entender os efeitos da umidade através das pontes térmicas e sua possível relação com proliferação de mofo.

## Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil.

## Referências

- ABNT, NBR 15.220-3 (2005). Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social I, Rio de Janeiro.
- ABNT, NBR 15.575-1 (2020). Edificações habitacionais - Desempenho Parte 1: Requisitos gerais, Rio de Janeiro.
- ABNT, NBR ISO 10211 (2022). Pontes térmicas na construção civil — Fluxos de calor e temperaturas superficiais — Cálculo detalhado, Rio de Janeiro.
- ABNT, NBR ISO 10456 (2022). Materiais e produtos de construção — Propriedades higrótérmicas — Valores e procedimentos de projeto tabulados para determinar valores térmicos declarados e de projeto, Rio de Janeiro.
- Eli, L.G; Krelling, A.F; Olinger, M.S; Melo, A.P; Lamberts, R. (2021). Thermal performance of residential buildings with mixed-mode and passive cooling strategies: The Brazilian context, *Energy and Buildings* 244, 111047, Brazil., <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111047>
- Freitas, J.R de; Cunha, E.G da (2018). Thermal bridges modeling in South Brazil climate: Three different approaches, *Energy and Buildings* 169, 271-282, Brazil, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.044>
- Dominković, D.F; Gianniou, P; Münster, M; Heller, A; Rode, C. (2018). Utilizing thermal building mass for storage in district heating systems: Combined building level simulations and system level optimization, *Energy* 153, 949-966, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.093>
- Triana, M.A; Lamberts, R; Sassi, P. (2015). Characterization of representative building typologies for social housing projects in Brazil and its energy performance, *Energy policy*. 87, 524-541, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.201508.041>
- Theodosiou, T.G; Papadopoulos, A.M. (2008). The impact of thermal bridges on the energy demand of buildings with double brick wall constructions, *Energy and Buildings* 40, 2083-2089, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.06.006>
- Veiga, R.K.S; Olinger, M.S; Krelling, A.F; Eli, L.G; Melo, A.P; Lamberts, R. (2020). Proposta para as escalas dos níveis de desempenho térmico de residências: NBR15575. 18 Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Porto Alegre.

## O risco entre o mau e o superdimensionamento das soluções acústicas ao considerar os valores de referência da própria norma de desempenho

Vitória Soares<sup>1</sup>, Raquel Rossatto<sup>1</sup>, Bárbara Fengler<sup>1</sup>, Karina Sá<sup>1</sup>, José Carlos Giner<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Giner Designing sound spaces, São Paulo, Brasil

### Resumo

A norma de desempenho ABNT NBR 15575 estabelece critérios para determinação de desempenho acústico das edificações. As construtoras e incorporadoras têm buscado o estudo para obter resultados com os quais possam avaliar as soluções para atendimento ao desempenho acústico conforme o nível que desejam atender, e, em suma, optam por soluções que possam incorporar com preferível custo-benefício para o projeto. O anexo F da norma NBR 15575-4 apresenta valores de referência do isolamento acústico dos elementos construtivos para que o projetista consiga consultar e adotar como parâmetro para alcançar o desempenho em campo exigido pela norma. O presente artigo busca verificar se a adoção dos valores apresentados na tabela é assertiva. O estudo verificou que, ao adotar a tabela para alcançar o desempenho desejado, pode ocorrer insuficiência ou superdimensionamento nas soluções, resultando em aumento de custos em fase de projeto ou aumento de custos para adotar soluções posteriores ao constatar o não atendimento.

### Abstract

The performance standard NBR 15575 establishes criteria to determinate the acoustic performance of buildings. Builders and designers have been looking for studies to obtain results that enable assessments of solutions to meet the acoustic performance, so they can opt for the best cost benefit solutions for the project. However, the Annex F of the standard NBR 15575 presents reference laboratory values that the designer can consult and adopt as a parameter to achieve the field performance required by the standard. This article seeks to validate if the adoption of the values presented in the table are assertive. The results show that choosing to adopt them to achieve the desired performance may present insufficiency or oversized of commitment in the solutions, resulting in higher costs in the design phase or higher costs after the construction to solve the problem.

### Introdução

Em 2021, a norma brasileira de desempenho NBR 15575 (ABNT, 2021a) foi atualizada, sendo revisada conforme emendas específicas das partes de desempenho térmico e acústico. Na parte de acústica, não houve alterações nos requisitos apresentados pela normativa ou outras alterações significativas. Na maior parte dos itens revisados, o objetivo foi esclarecer itens genéricos e ambíguos na versão anterior da norma.

Entretanto, uma tabela bastante questionada e que teve sua permanência em discussão, inclusive durante as reuniões da ABNT, ainda se mantém na norma. Apesar de serem apresentados como valores de referência e de a própria norma sugerir a adoção de métodos mais robustos, a dita tabela pode levar a decisões equivocadas.

Para predição do atendimento da norma ainda em fase de projeto, a norma sugere a aplicação dos cálculos apresentados pela ISO 12354-1 (2017a). Nesse sentido, as construtoras e incorporadoras buscam profissionais com expertise técnica para emitir esses estudos, sendo essa etapa incorporada ao processo de desenvolvimento de um novo produto.

Para a análise de desempenho do ruído aéreo, a norma especifica requisitos para Diferença Padronizada do Nível de Pressão Sonora,  $DnTw$ , o qual depende das características dos espaços avaliados, tais como volume dos ambientes, área da divisória, tempo de reverberação do ambiente de recepção e transmissões secundárias. Dessa forma, esse parâmetro é importante para caracterizar o desempenho do sistema construtivo *in loco*, não sendo eficiente para caracterização do desempenho acústico da composição.

Em contrapartida, o  $Rw$  é o Índice de Redução Sonora, grandeza que estabelece o isolamento acústico de uma composição, sendo isso ensaiado em laboratório, em condições específicas e ideais.

Apesar de existir uma relação numérica entre ambas as grandezas, essa não é uma relação simples, sendo necessários diversos cálculos sobre as considerações das características da edificação: volume dos ambientes em análises, área da partição em análise, sistemas construtivos dos sistemas adjacentes, instalações existentes etc. Mesmo assim, no anexo F da norma NBR 15575-4 (ABNT, 2021b), é apresentada uma tabela que relaciona essas grandezas, sendo indicado o  $Rw$  necessário para atendimento ao desempenho de  $DnTw$ , para o caso de serem utilizadas composições leves ou pesadas.

Na Tabela 1, consta um resumo dos valores apresentados como referência no anexo F da norma para elementos pesados. As situações estão descritas conforme critérios de atendimento, sendo:

- Situação 1: “Parede entre unidades habitacionais autônomas (parede de geminação), nas situações em que não haja ambiente dormitório”;
- Situação 2: “Parede entre as unidades habitacionais autônomas (parede de geminação),

caso pelo menos um dos ambientes seja dormitório;

- Situação 3: "Parede cega entre o dormitório ou sala de uma unidade habitacional e as áreas comuns de permanência de pessoas, atividades de lazer e atividades esportivas, como *home theater*, salas de ginástica, salão de festas, salão de jogos, banheiros e vestiários coletivos, cozinhas e lavanderias coletivas"; e
- Situação 4: "Parede cega entre o dormitório de uma unidade habitacional e as áreas comuns de trânsito eventual, como corredores e escadarias".

Tabela 1: Representação simplificada do anexo F da norma NBR 15575-4 (ABNT, 2021b)

Situação	DnTw em dB requisito da norma	Rw em dB de referência para sistemas pesados
Situação 1	≥ 40	≥ 43
Situação 2	≥ 45	≥ 48
Situação 3	≥ 45	≥ 48
Situação 4	≥ 40	≥ 43

Nesse sentido, o objetivo do presente artigo é apresentar comparações dos valores obtidos a partir de simulações computacionais, resultados dos ensaios *in loco* das situações avaliadas e os valores apresentados pela Tabela 1.

A partir dos resultados simulados de DnTw comparados aos ensaiados em campo, pretende-se validar os modelos de simulações. A partir da validação dos modelos de simulação, são comparados os valores de Rw considerados em cada simulação com os valores indicados como referência no anexo F da norma, a fim de ilustrar que esses valores são refutáveis e podem levar ao erro.

## Simulação e Experimentos

Para validar o atendimento aos requisitos de desempenho acústico da norma (ABNT, 2021b), são realizados ensaios em campo do valor de DnTw, para o caso do ruído aéreo, conforme metodologia de ensaio descrita pela NBR 16283-1 (ISO ABNT, 2018). O ensaio consiste em utilizar uma fonte omnidirecional, que atenda a critérios específicos da própria norma, com um ruído padronizado, e realizar ensaios em alguns pontos no ambiente emissor e receptor. Também deve ser realizado o ensaio de tempo de reverberação no ambiente receptor. Todas as medições são realizadas em bandas de terço de oitava. O valor de DnTw é um valor ponderado em frequência, da diferença

entre os níveis de pressão sonora verificados entre o ambiente de emissão e recepção, após serem realizadas as correções necessárias.

Por outro lado, a fim de obter resultados em fase de projeto, evitando futuras reclamações, despesas não previstas e problemas, é crescente a busca de simulações de desempenho acústico por parte das construtoras. Essas simulações são realizadas com base na metodologia de cálculos apresentada pela série de normas internacionais 12354, partes 1 a 3 (ISO 2017a, ISO 2017b, ISO 2017c) e conseguem considerar, com esses cálculos, as características dos ambientes em análise, bem como as transmissões secundárias para obtenção do resultado em campo do futuro empreendimento.

O estudo de Fengler, Rocha, Sá e Giner (2022), apresenta uma diferença de no máximo 1 dB entre os valores simulados por essa metodologia de cálculo se comparado aos valores obtidos nos ensaios *in loco*.

Nessas simulações, é necessário modelar o edifício, conforme bases arquitetônicas do projeto. Com isso, as informações geométricas dos ambientes como área, volume, conexões e ambientes adjacentes já serão conhecidas.

Outro dado de entrada informado no modelo são os elementos construtivos utilizados no projeto e seus respectivos índices de redução sonora. Esses, por sua vez, são inseridos na simulação conforme os resultados de ensaio em laboratório de cada material, geralmente realizado pelo próprio fornecedor dessa composição.

Caso não haja o ensaio em laboratório de alguma composição utilizada, é possível modelar novos materiais a partir de características como densidade, espessura, módulo de elasticidade, entre outros, com o *software* comercial Insul, o qual também apresenta um banco de dados com os Rw de diversos materiais.

No presente estudo, foram selecionados alguns estudos de caso. Os empreendimentos de cada estudo foram modelados no *software* de simulação de isolamento acústico SONArchitect versão 3.1.11, o qual utiliza a metodologia de cálculo apresentada pela ISO 12354-1 (2017a).

Os dados de entrada das composições aplicados a cada estudo de caso estão descritos na Tabela 2. Essas composições foram desenvolvidas no *software* Insul, a partir das informações coletadas, ou conforme relatórios das composições ensaiadas em laboratório pelo fornecedor das alvenarias.

Tabela 2: Identificação dos estudos de caso e os respectivos input inseridos nas simulações

Estudo de caso	Divisória	Composição
1	Sala/Cozinha de unidades distintas - situação 1 conforme Tab. 1	Bloco cerâmico de 140 mm com revestimento em argamassa esp.: 25 mm e revestimento cerâmico em cada face
2	Dormitórios de unidades distintas - situação 2 conforme Tab. 1	Bloco cerâmico de 90 mm com contraparede em <i>drywall</i> em ambos os lados da divisória
3	Dormitórios de unidades distintas - situação 2 conforme Tab. 1	Bloco cerâmico de 90 mm com contraparede em <i>drywall</i> em ambos os lados da divisória
4	Salas de unidades distintas - situação 1 conforme Tab. 1	Bloco cerâmico de 140 mm com revestimento em argamassa esp.: 15 mm em cada face
5	Sala/Cozinha de unidades distintas - situação 1 conforme Tab. 1	Bloco cerâmico de 140 mm com revestimento em argamassa esp.: 25 mm e revestimento cerâmico em cada face
6	Entre Sala/Cozinha de unidade habitacional e Brinquedoteca – situação 3 conforme Tab. 1	Bloco cerâmico de 140 mm com revestimento em argamassa esp.: 25 mm e revestimento cerâmico em uma face e revestimento em gesso esp.: 10 mm na outra face
7	Divisória entre <i>hall</i> e Dormitório – situação 4 conforme Tab. 1	Bloco cerâmico de 140 mm com revestimento em gesso esp.: 10 mm em cada face
8	Sala/Cozinha de unidades distintas - situação 1 conforme Tab. 1	Bloco cerâmico de 140 mm com revestimento em argamassa esp.: 25 mm e revestimento cerâmico em cada face
9	Áreas de serviço de unidades distintas - situação 1 conforme Tab. 1	Bloco cerâmico de 140 mm com revestimento em argamassa esp.: 20 mm em cada face
10	Dormitórios de unidades distintas - situação 2 conforme Tab. 1	Bloco de concreto estrutural de 140 mm com revestimento em gesso esp.: 25 mm em cada face

Após a construção desses edifícios residenciais, foram realizados os ensaios em campo, seguindo os procedimentos da norma NBR 16283-1 (ISO ABNT, 2018) nos mesmos casos dos apresentados na Tabela 2. Na Tabela 3, estão apresentados os resultados obtidos por meio das simulações e ensaios em obra do DnTw, bem

como os valores mínimos desse parâmetro para atendimento da norma, a depender da situação avaliada.

Os valores de DnTw medidos em campo após a finalização da obra são comparados aos valores simulados, a fim de validar os modelos computacionais. É possível perceber que a maior diferença entre valor simulado e ensaiado *in loco* é de 2 dB, sendo que, na maioria dos casos, essa diferença é ainda menor ou inexistente. Com esses resultados, temos a validação dos modelos de simulação.

Tabela 3: Comparações entre valores simulados e ensaiados em campo para validação

Estudo de caso	DnTw [dB] Requisito da NBR 15575-4: 2021	DnTw [dB] Simulação	DnTw [dB] Ensaio <i>in loco</i>
1	≥ 40	42	40
2	≥ 45	46	48
3	≥ 45	45	46
4	≥ 40	43	44
5	≥ 40	44	44
6	≥ 45	47	47
7	≥ 40	43	41
8	≥ 40	45	46
9	≥ 40	41	40
10	≥ 45	43	45

Na Tabela 4 estão apresentados os *Rw* da composição de cada um dos estudos de caso considerados nos modelos de simulação, bem como o valor mínimo de *Rw* sugerido para elementos pesados no anexo F da norma NBR 15575-4 (ABNT, 2021b). Partindo da validação dos modelos, é possível confrontar os valores de *Rw* simulados com os valores de referência indicados no anexo F da NBR 15575-4 (ABNT, 2021b). As análises e discussões referente a essas comparações constam na próxima seção.

Tabela 4: Comparações entre valores de referência do anexo F da norma NBR 15575-4 (ABNT, 2021b) e os valores de *Rw* simulados

Estudo de caso	<i>Rw</i> [dB] de referência para sistemas pesados indicados pela NBR 15575-4: 2021	<i>Rw</i> [dB] considerado no modelo de simulação
1	≥ 43	46
2	≥ 48	52
3	≥ 48	52
4	≥ 43	43
5	≥ 43	46
6	≥ 48	45
7	≥ 43	41
8	≥ 43	46
9	≥ 43	43
10	≥ 48	46



## Discussão e Análise dos resultados

Comparando os Estudos de casos 1, 5 e 8, tem-se a mesma situação em análise: divisória entre salas/cozinhas de unidades distintas, e, portanto, os mesmos requisitos normativos: DnTw mínimo de 40 dB. Deve ser verificado, ainda, que o Rw entre os três estudos de caso citados é o mesmo, uma vez que, conforme Tabela 2, a composição é idêntica. Mesmo com essas características similares, no Estudo de caso 1, o resultado do ensaio em campo foi de 40 dB; no Estudo de caso 5, 44 dB; e no Estudo de caso 8, resultado ensaiado de 46 dB. É possível verificar uma grande variação nos resultados de DnTw obtidos, tanto por meio de medições como nas simulações, entre os três casos avaliados, ainda que tenha sido utilizada a mesma composição. A partir desse resultado, é possível concluir que uma mesma composição pode ser suficiente em uma determinada situação ou em um edifício, mas não em outro. Isso se deve à complexibilidade do problema em questão, sendo evidenciada a importância de estudos e simulações dos edifícios residenciais.

Analisando de forma particular o Estudo de caso 1, verifica-se que a norma sugere a utilização de uma composição com Rw mínimo de 43 dB. Nesse edifício, foi utilizada uma composição com Rw de 46 dB e o resultado obtido *in loco* foi equivalente ao limite de atendimento da norma de desempenho, DnTw igual a 40 dB. Dessa forma, caso a opção fosse pela não realização de uma simulação de desempenho acústico, mas pela definição da composição conforme recomendação da própria norma, provavelmente o requisito normativo não seria atendido. Nessa situação, a norma levaria o projetista a um erro de concepção, o qual provavelmente seria verificado somente em fase final de obra, sendo necessária uma solução provavelmente mais robusta e custosa, visto que soluções mais simples e sem alteração da área interna dos ambientes, como troca do fornecedor ou tipo do bloco, não seriam mais possíveis.

Essa situação também pode ser verificada nos casos 2 e 3: foi utilizada uma composição com Rw consideravelmente acima do valor recomendado pela norma, mas os requisitos da norma de DnTw foram atendidos praticamente no limite, especialmente no Estudo de caso 3.

Já nos Estudos de caso 6, 7 e 10, foram utilizadas composições com Rw menores que as sugeridas na Tabela F da norma e, mesmo assim, foram atingidos os valores de DnTw. Nessas situações, seguir os valores de Rw recomendados pela norma poderia fazer com que a construtora gastasse mais, seja em uma solução com material específico e/ou com uma mão de obra especializada, sem a real necessidade desse custo adicional.

A partir desses resultados e análises, é possível concluir que a Tabela F da parte 1 da NBR 15575-4 (ABNT, 2021b) não é adequada para o auxílio de projetistas e construtores na tomada de decisões em fase de projeto. Cada situação deve ser avaliada especificamente, a fim de verificar todas as variáveis e interferências envolvidas e, apenas após essa análise individual e detalhada, realizada por meio de simulações de isolamento acústico dos

edifícios, definir se há necessidade de uma solução. Em caso afirmativo, deve-se simular diferentes cenários a fim de encontrar a melhor solução.

De forma geral, a análise das Tabelas 3 e 4 permitem concluir que os resultados obtidos possuem variações e não apresentam constância de assertividade.

## Conclusões

Levando em consideração os valores obtidos e as análises apresentadas, pode-se concluir que a Tabela F da norma NBR 15575-4 (ABNT, 2021b) induz ao erro. Uma primeira tendência ao erro seria uma escolha equivocada da composição a ser utilizada, sendo verificado apenas na fase final da obra, por meio dos ensaios em campo, que o desempenho de DnTw da mesma norma, de caráter obrigatório, não foi atendido.

Em outras situações, entretanto, a situação é justamente a oposta: os valores de referência tendem à utilização de uma composição mais robusta, e, por isso, possivelmente mais custosa ao construtor.

Uma vez que os resultados de DnTw são complexos e dependem de diversos fatores geométricos dos ambientes e também construtivos, conclui-se que não pode ser utilizada uma regra generalista, como a apresentada na tabela em questão, que determina os valores de Rw a partir dos critérios de DnTw. Nesse sentido, existem simulações do isolamento acústico muito mais precisas, conforme apresentado no presente estudo, capazes de oferecer as respostas necessárias aos projetistas ainda em uma fase inicial de desenvolvimento de produto e projeto, evitando surpresas na obra, reclamações e despesas não previstas em orçamento.

## Agradecimentos

Agradecemos à Giner pela disponibilidade do *software* SONArchitect para realização dos modelos de simulação dos estudos apresentados, bem como pela disponibilidade dos valores ensaiados em campo pela equipe de laboratório. Além disso, agradecemos o incentivo para realização de pesquisas importantes na área de atuação da empresa, como a apresentada.

## Referências

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15575: Edificações habitacionais - Desempenho. Rio de Janeiro, 2013a.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15575: Edificações habitacionais - Desempenho - Parte 4: Sistemas de vedações verticais internas e externas. Rio de Janeiro, 2013b.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 16283 Acústica - Medição de campo de isolamento acústico nas edificações e nos elementos de edificações. Parte 1 - Ruído aéreo. Rio de Janeiro, 2018.
- Fengler, B.; Rocha, R. R.; Sá, K. e Giner, J. C (2022). Comparação da norma EN 12354 versões 2000 e 2017 aplicada às simulações de desempenho acústico

em edificações. XII Congresso Ibero-americano de acústica e XXIX Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica, Florianópolis, SC, Brasil.

International Organization for Standardization. ISO 12354: Building acoustics — estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements — part 1: Airborne sound insulation between rooms, 2017a.

International Organization for Standardization. ISO 12354: Building acoustics — estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements — part 2: Impact sound insulation between rooms, 2017b.

International Organization for Standardization. ISO 12354: Building acoustics — estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements — part 3: Airborne sound insulation against outdoor sound, 2017c.

## Influência da configuração direcional e angular do sistema de ar-condicionado na temperatura e velocidade do ar

Brenda da Costa Loeser, Liége Garlet, Natasha Hansen Gapski, Mateus Bavaresco,  
Ana Paula Melo, Roberto Lamberts  
Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.

### Resumo

Este estudo avaliou o impacto de diferentes configurações de fluxo do ar-condicionado (direção e ângulos de saídas) na distribuição vertical de temperatura e de velocidade do ar utilizando simulações de CFD. As análises foram realizadas considerando a variação do local do posto de trabalho (central e canto), a direção de saída do fluxo de ar (2Dx, 2Dy e 4D) e a variação angular de saída (20°, 40° e 60°). Assim, em cada caso avaliou-se a temperatura (homogeneidade e concordância com o *setpoint* 24 °C) e a velocidade do ar (limite de 0,2 m/s) em três alturas.

### Introdução

Apesar de comumente empregados em avaliações de conforto humano, estudos de campo não possibilitam o controle de parâmetros internos para avaliar isoladamente seus impactos nos indicadores observados (e.g. índices fisiológicos ou níveis de conforto). Quando estas avaliações são realizadas em ambientes controlados, pode-se fazer investigações mais detalhadas sobre os ocupantes destes espaços e suas percepções.

Em função disso, muitas instituições de pesquisa construíram locais especiais para experimentos na área de conforto humano, designados como salas de testes, câmaras climáticas ou laboratórios. Com *layouts* específicos, escolha dos parâmetros construtivos, sistemas de climatização apropriados e equipamentos de medição para inúmeras análises (PISELLO et al., 2021).

Neste sentido, o Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) está finalizando a construção de uma câmara climática para avaliação de conforto humano em ambientes internos.

Diversas tomadas de decisão nesta etapa preliminar podem se beneficiar de processos de modelagem matemática, como simulações computacionais. Ou no melhor dos cenários, soluções de medição em campo podem ser combinadas às soluções de modelagem numérica para validação de dados medidos *versus* dados simulados quando o protótipo estiver em uso.

As simulações de dinâmica computacional de fluidos (CFD) fornecem uma análise abrangente dos fluxos internos de ar e podem ser utilizadas como diretrizes para concepção de projetos. Através dos modelos de CFD é

possível presumir a distribuição de temperatura e velocidade do ar, simular a eficiência de aparelhos de ar-condicionado, visualizar o fluxo de ar e, conseqüentemente, adequar ventilações e outras propriedades no ambiente interno (CHOWDHURYA, RASUL e KHANC, 2022).

Ao utilizar o software DesignBuilder para as simulações de CFD, pode-se contar com a vantagem deste software que apresenta um processo de modelagem simplificado, fornecendo a geometria e as condições de contorno (SILVA, 2016). O CFD presente no software DesignBuilder é baseado no método numérico de volumes finitos, que envolve a solução de equações diferenciais parciais que descrevem a conservação de energia, de massa e de quantidade de movimento (DESIGNBUILDER, 2022).

A partir dessas premissas e da necessidade de compreender o comportamento do fluxo de ar da câmara climática projetada pelo LabEEE, buscou-se avaliar o impacto das diferentes configurações do ar-condicionado na distribuição vertical da temperatura e velocidade do ar em dois layouts de ocupação, com o uso de simulação computacional. O objetivo dessas avaliações é guiar as tomadas de decisão quanto às possibilidades de testes de conforto humano favorecidas pelos possíveis ajustes no sistema de climatização adotado na sala de testes.

### Metodologia

Esta seção detalha a avaliação da distribuição vertical da temperatura e velocidade do ar, por meio de simulação computacional de CFD com uso do software DesignBuilder v. 7.0.2.004. A simulação foi realizada para a cidade de Florianópolis/SC, adotando o arquivo climático INMET (CLIMATE ONE BUILDING, 2022).

O projeto da câmara climática será executado dentro de uma sala no segundo pavimento do prédio da Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. A câmara foi projetada em *steel frame*, com paredes sanduíche revestidas por placas de gesso de 1,25 cm de espessura e 10 cm de isolamento interno em lâ de vidro. A distância entre o forro e a laje do terceiro pavimento do edifício é de 30 cm, com fechamento composto por placa de gesso para área interna e isolante térmico (10 cm). O piso recebe o isolamento térmico logo acima da laje de

concreto do edifício e fechamento em placas cimentícias de espessura 2,5 cm.

As propriedades termofísicas dos materiais são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Propriedades termofísicas dos materiais

Materiais	Espessura (cm)	Condutividade Térmica (W/m.K)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Calor específico (J/kg.K)	Absortância Térmica	Absortância Solar
Placa cimentícia	2,5	0,5	1520	1000	0,9	0,2
Placa gesso externo	1,25	0,187	800	1000	0,9	0,3
Placa gesso interno	1,25	0,25	1000	1000	0,9	0,3
Lã de vidro	10	0,045	50	700	0,9	0,7
Chapa fibra de madeira	0,6	0,15	560	2500	0,9	0,3
Cerâmica (tijolo)	1,3	0,9	1600	920	0,9	0,3
Argamassa	2,5	1,15	2000	1000	0,9	0,3
Concreto (laje)	12	1,75	2000	1000	0,9	0,3

Foram configurados dois *layouts* de mobiliário para as análises: o *layout* 1, considerando o gabinete de trabalho exatamente abaixo do aparelho condicionador de ar (Figura 1 e Figura 2); e o *layout* 2, com mobiliário e posição do ocupante em um dos extremos da sala (Figura 3).

A câmara climática apresenta uma janela de abrir/tomar composta por vidros duplos de 6 mm e câmara de ar de 12 mm entre eles.

Para a modelagem da simulação computacional foi considerada a geometria das salas imediatamente abaixo, acima e ao lado da sala que abriga a câmara climática. E seus materiais compostos por divisórias laterais em chapas rígidas de fibras de madeira, laje de concreto, parede externa de tijolo cerâmico com revestimento em argamassa e janela de vidro simples 3 mm.

Também foram configuradas as cargas internas do modelo, considerando 15 W/m<sup>2</sup> para iluminação, atividade de escritório de uma pessoa (110 W) com temperatura corporal de 35 °C, um computador e uma mesa de trabalho configurados apenas como barreiras de ar.

Considerou-se para a simulação térmica, o funcionamento simultâneo de um ar-condicionado na sala externa e outro na câmara climática entre 8h e 18h. Ambos foram

configurados como um equipamento de ar-condicionado do tipo VRF (Fluxo de Refrigerante Variável) com vazão de 450 L/s e *setpoint* de 24 °C.

Após a simulação térmica, definiram-se as condições de contorno do modelo CFD no *DesignBuilder*. A geometria da câmara foi dividida em uma malha cartesiana não uniforme, com limitação de espaçamento de 0,03 m. Foram configuradas a velocidade de saída do ar para 1,8 m/s e a temperatura de insuflamento de 16 °C. As temperaturas superficiais da câmara foram importadas da simulação térmica gerada previamente. Após a convergência dos cálculos, extraíram-se os dados do plano de corte do modelo do CFD inserido no eixo atrás do bloco humano representativo de cada *layout*.

Para as avaliações, consideram-se os pontos de análise:

- Uma pessoa em um posto de trabalho, variando a sua posição em cada *layout* (Figuras 1 a 3).
- A configuração do aparelho de ar-condicionado considerou 3 variações de saídas de ar: em 4 direções (4D), 2 sentidos no eixo x (2Dx), e 2 sentidos no eixo Y (2Dy). Em cada direção variou-se o ângulo da saída de ar em 20°, 40° e 60°.
- Os pontos de avaliação (temperatura e velocidade do ar) foram configurados em três alturas: 0,10 m, 0,60 m e 1,10 m. Todas as medições posicionadas centralizadas e imediatamente atrás do bloco humano representativo.

As análises consideraram a configuração do equipamento de ar-condicionado (ângulo e direção), a distribuição vertical da temperatura do ar e a velocidade do ar nos diferentes *layouts*. Os parâmetros observados para a temperatura do ar foram a homogeneidade, com análise do desvio padrão entre as alturas, e a concordância com o *setpoint* de 24 °C. Para a velocidade do ar, observou-se os valores máximos de 0,2 m/s, dentro do limite de aplicabilidade do método da zona analítica de conforto térmico da ASHRAE 55 (2020) e do projeto de norma adaptado para o contexto brasileiro NBR 16401-2 (ABNT, 2021).

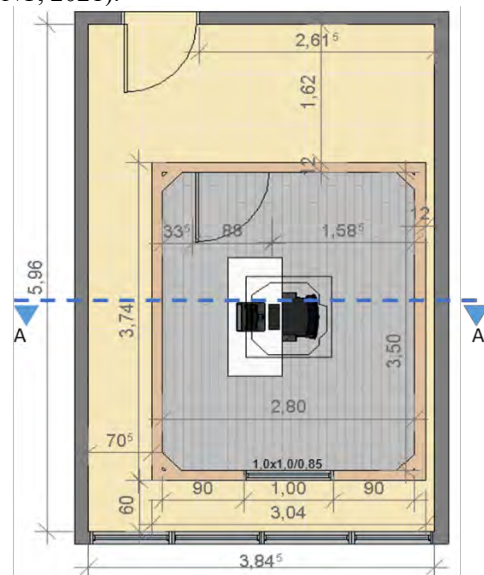


Figura 1: Planta Baixa - Layout 1

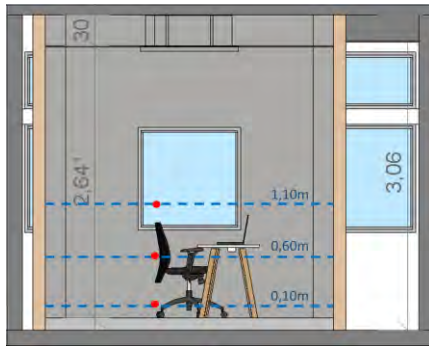


Figura 2: Corte AA - Layout 1

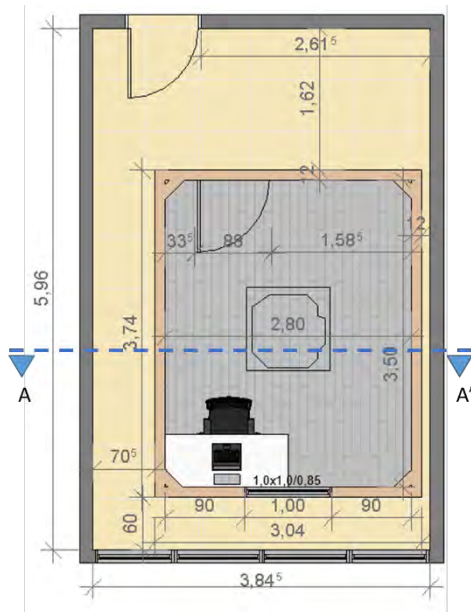


Figura 3: Planta Baixa - Layout 2

## Análise dos Resultados e Discussão

### Layout 1

A análise dos resultados para o layout 1 (Figura 1), ocupante centralizado, demonstrou que em todos os arranjos de direção, dependendo da inclinação da saída do ar no ambiente, poderá ter temperatura do ar acima do *setpoint* 24 °C e a velocidade do ar superior ao limite de aplicabilidade do método da zona analítica de conforto térmico de 0,2 m/s.

No caso 4D (Figura 4), as temperaturas do ar variaram entre 21,99 °C (a 0,1 m e ângulo de 20°) e 25,78 °C (a 0,6 m e ângulo de 60°). O ângulo de 60° foi o único o qual obteve todas as velocidades do ar abaixo de 0,2 m/s nas três alturas avaliadas. Além disso, resultou em maior homogeneidade da temperatura do ar nos pontos de medição e temperaturas acima do *setpoint* estipulado. Os demais ângulos apresentaram menor homogeneidade da temperatura do ar e valores de velocidade do ar acima de 0,20 m/s. Na Figura 4 são apresentados os dados de temperatura são apresentados em barras e os de velocidade do ar em pontos. Este padrão também foi adotado para os demais gráficos com análises similares.

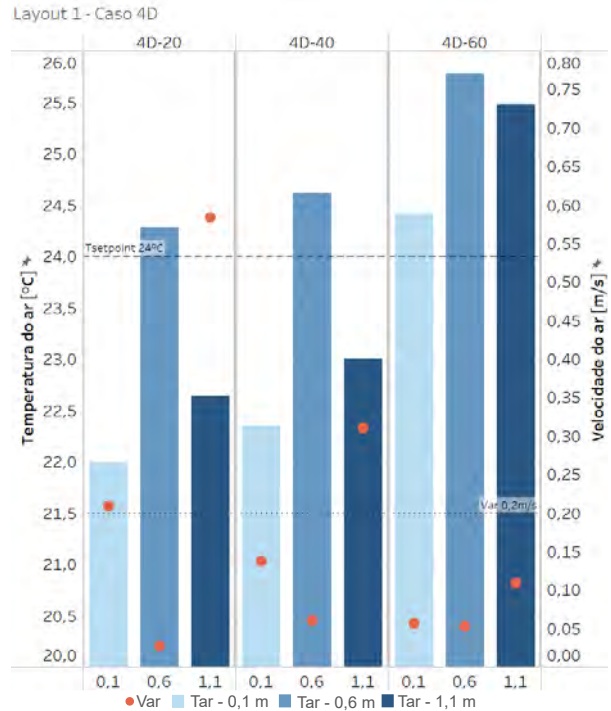


Figura 4: Distribuição da temperatura e da velocidade do ar do caso 4D, nas diferentes alturas (0,1, 0,6 e 1,1)

No caso 2Dx, as temperaturas do ar variaram de 21,63 °C a 25,17 °C. Para todos os ângulos, observou-se velocidade do ar acima de 0,20 m/s e temperaturas do ar acima do *setpoint* em pelo menos uma das três alturas avaliadas (Figura 5). O ângulo de 60° apresentou maior homogeneidade entre as temperaturas do ar nas diferentes alturas.

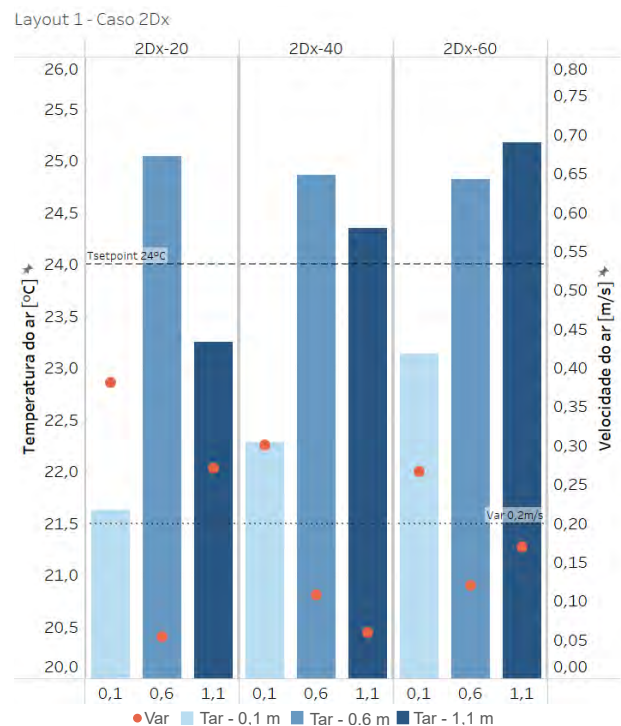


Figura 5: Distribuição da temperatura e da velocidade do ar do caso 2Dx, nas diferentes alturas (0,1, 0,6 e 1,1)

No caso 2Dy, as temperaturas variaram entre 22,65°C e 25,49 °C, e todos os ângulos avaliados apresentaram pelo menos uma das velocidades do ar superior a 0,2 m/s e temperaturas do ar maiores do que o *setpoint* (Figura 6). O ângulo de 60° se manteve com temperaturas mais homogêneas do que as demais.

Layout 1 - Caso 2Dy

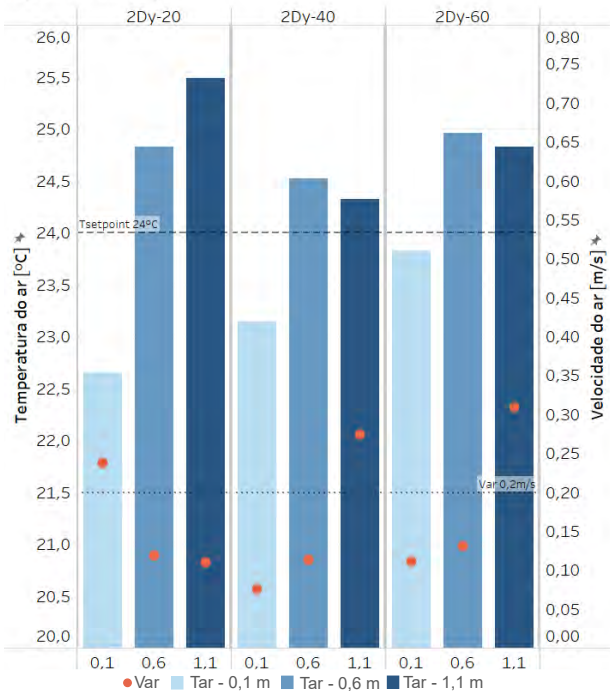


Figura 6: Distribuição da temperatura e da velocidade do ar do caso 2Dy, nas diferentes alturas (0,1, 0,6 e 1,1)

Entre todos os casos do layout 1, o ângulo de 60° resultou em maior homogeneidade da temperatura do ar. Este ângulo direcionou o fluxo de ar para as extremidades da câmara (paredes), influenciando na baixa variação da temperatura da região central. A combinação 4D-60° (Figura 7) exemplifica a maior dispersão do ar e temperatura no posto de trabalho central, se comparado aos demais casos.

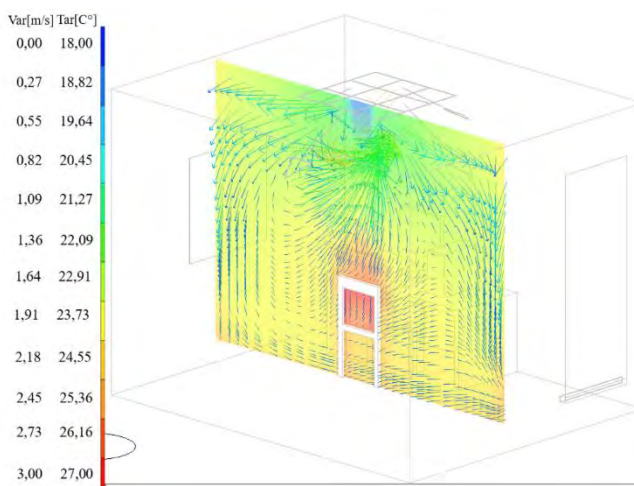


Figura 7: Fatia CFD caso 4D-60°

Por outro lado, o ângulo de 20° tornou o ambiente térmico menos homogêneo na distribuição vertical, tanto em relação à temperatura quanto à velocidade do ar (Figura 8).

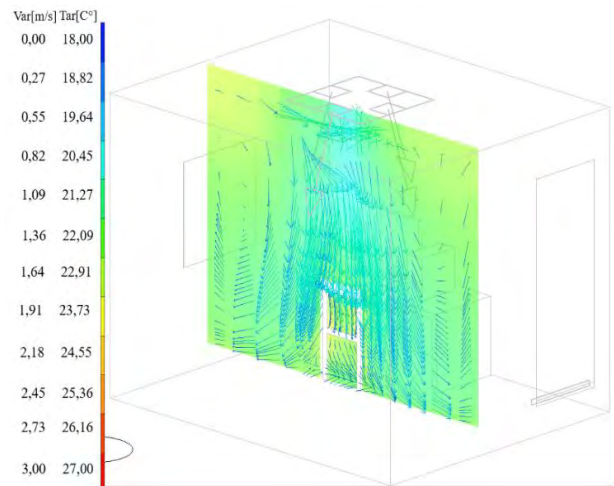


Figura 8: Fatia CFD caso 4D-20°

A configuração 2Dy apresentou temperaturas do ar mais homogêneas que as demais configurações (Figura 9). Os casos de apenas 2 saídas de ar ocasionaram maior fluxo no centro da câmara. Tal fator se deve à maior vazão de ar individual das saídas em relação à configuração 4D (Figuras 7).

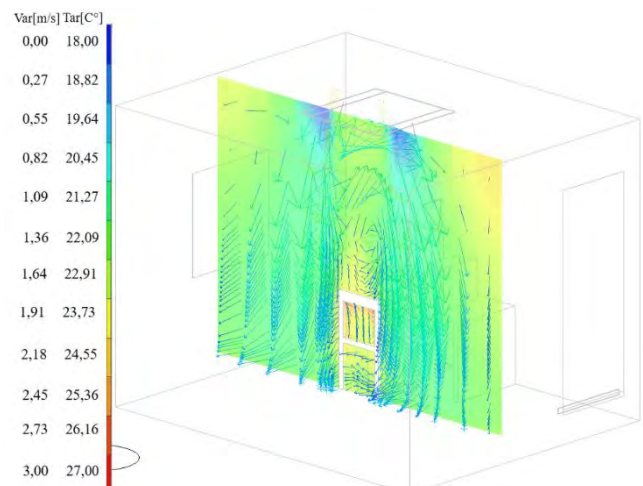


Figura 9: Fatia CFD caso 2Dy-60°

### Layout 2

O layout 2, posição do ocupante na extremidade da câmara, resultou em temperaturas abaixo do *setpoint* de 24 °C em todas as alturas e ângulos de saída avaliados.

O caso 4D expressou resultados de temperatura entre 20,81 °C e 23,84 °C. Obtiveram-se velocidades do ar abaixo de 0,2 m/s em todos os demais ângulos, com exceção do ponto 0,10 m no ângulo de 20°. Para os ângulos de 40° e 60°, observaram-se temperaturas mais homogêneas e velocidades do ar abaixo de 0,2 m/s, sendo o ângulo de 60° com temperaturas mais próximas do *setpoint* desejado (Figura 10).

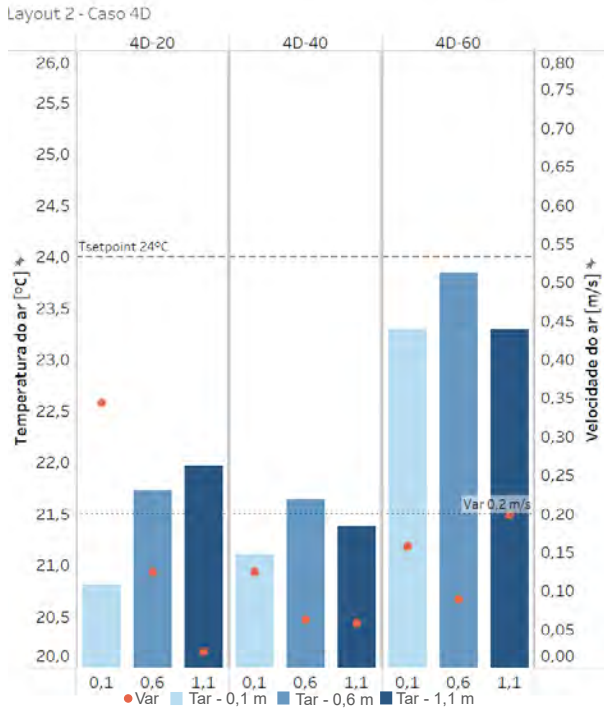


Figura 10: Distribuição da temperatura e da velocidade do ar do caso 4D, nas diferentes alturas (0,1, 0,6 e 1,1)

Para o caso 2Dx, a temperatura do ar variou entre 21,29°C e 23,86 °C. Os ângulos de 20° e 40° apresentaram todas as velocidades acima de 0,2 m/s, sendo o ponto de 1,10 m no ângulo de 20° a maior velocidade do ar entre todos os casos do layout. O ângulo de 60° apresentou temperaturas maiores e menos homogêneas e velocidades mais baixas que as demais (Figura 11).

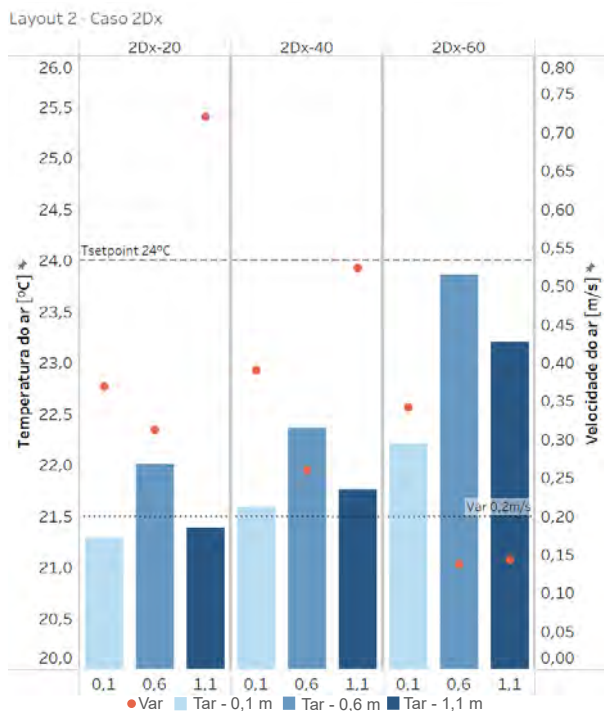


Figura 11: Distribuição da temperatura e da velocidade do ar do caso 2Dx, nas diferentes alturas (0,1, 0,6 e 1,1)

O caso Dy resultou em temperaturas do ar entre 21,5 °C e 23,25 °C. O ângulo de 60° apresentou temperaturas mais homogêneas que as dos demais ângulos (Figura 12).

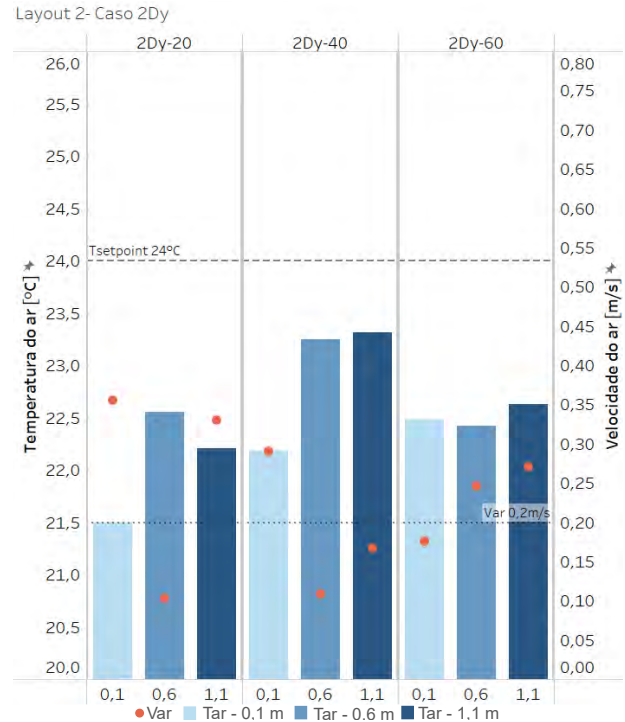


Figura 12: Distribuição da temperatura e da velocidade do ar do caso 2Dy, nas diferentes alturas (0,1, 0,6 e 1,1)

No layout 2, as configurações de 4D apresentaram, aproximadamente, 90% das medidas de velocidade do ar abaixo do limite proposto de 0,2 m/s. Enquanto a configuração 2Dx resultou em maiores velocidades do ar entre todos os casos. Tal resultado é justificado pela maior dissipação do fluxo de ar nas quatro direções, enquanto os casos 2Dx e 2Dy direcionam o fluxo para a região próxima ao ocupante (Figuras 13 e 14).

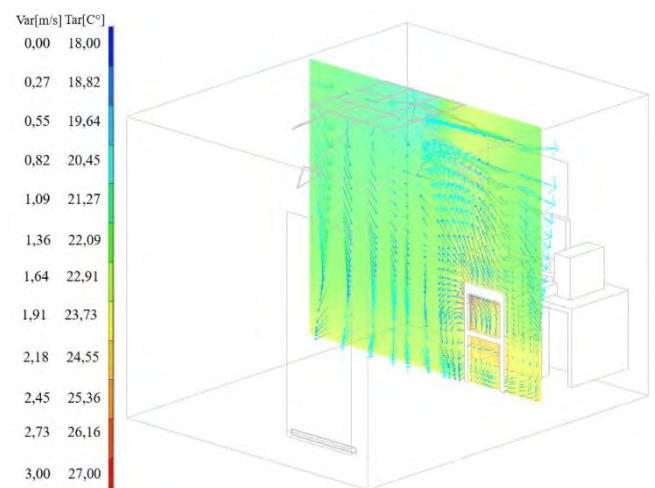


Figura 13: Fatia CFD caso 4D-60°

Em ambas as configurações 2D, o ângulo de 20° resultou em maiores velocidades do ar na altura de 1,10 m (Figuras 11 e 12). A posição do posto de trabalho na extremidade

da câmara aproxima o ocupante das regiões onde o fluxo de ar sofre maior perturbação. Tal fator decorre do contato do ar com os obstáculos (paredes e mobília). Por esse motivo, os mesmos ângulos resultaram em cenários distintos em cada configuração. Essa região de contato também impactou em temperaturas abaixo do *setpoint* de 24 °C.

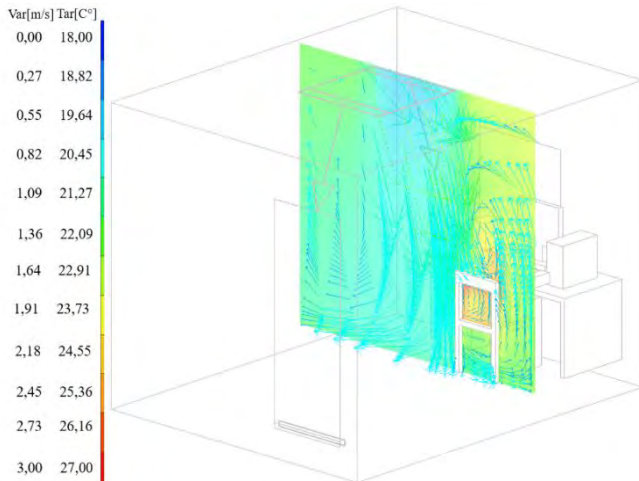


Figura 14: Fatia CFD caso 2Dy-20°

## Conclusão

Os modelos gerados em cada *layout* possibilitaram avaliar a influência da configuração do ar-condicionado (direção e ângulo do fluxo) na distribuição vertical da temperatura e velocidade do ar. O *layout* 1, com o usuário centralizado, resultou em temperaturas do ar, próximo ao usuário, acima do *setpoint* de 24°C. Neste caso, as análises de CFD indicaram incidência direta do ar frio insuflado nas paredes, reduzindo as temperaturas periféricas em relação às temperaturas centrais. Tal *layout* teve maior influência do fluxo resultante da região de contato, o que permitiu maior influência da variação angular nos resultados. É possível destacar que o ângulo de 60° tornou as medições de temperatura mais homogêneas, enquanto o de 20° aumentou o fluxo de ar nos pontos de medição e resultou em temperaturas menos homogêneas. O caso 4D-60° se destaca por ser o único caso em que todas as velocidades foram abaixo do limite de 0,2 m/s.

A proximidade do *layout* 2 com as paredes da câmara resultou, em todas as condições, em temperaturas do ar verticalmente mais homogêneas que o *layout* 1 e abaixo do *setpoint* de 24 °C. As barreiras de ar impactaram na dispersão do ar, implicando em relações menos diretas da variação do ângulo de saída nos resultados. A configuração em 4D resultou no cenário com maior quantidade de pontos com velocidade do ar abaixo de 0,2 m/s. Enquanto o caso 2Dx apresentou os maiores valores de velocidade.

Ressalta-se que este trabalho limitou-se à simulação computacional do modelo em um instante no tempo (13h)

do dia da semana mais quente de verão (31/01). Desenvolvimentos futuros irão contemplar a calibração e validação do modelo simulado por meio de medições *in loco*. Os resultados deste estudo podem guiar experimentos realizados no ambiente real visando estimar o impacto das diferentes estratificações de velocidades e temperaturas do ar em percepções humanas.

## Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil.

Agradecimento especial à Saint-Gobain Brasil pela doação dos materiais e mão-de-obra para a construção da Câmara Climática. À Daikin Brasil e à Sicflux pela doação do sistema de HVAC, e às demais empresas que colaboraram com este projeto.

## Referências

- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. ANSI/ASHRAE Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, 2020.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT. NBR 16401-2: Instalações de condicionamento de ar — Sistemas centrais e unitários. Parte 2: Parâmetros de conforto térmico. Projeto de revisão da norma. 2021. Disponível em: <https://labeec.ufsc.br/sites/default/files/210126%20PROJETO%2016401-2.pdf>
- Climate One Building. Arquivos Climáticos. Disponível em: [https://climate.onebuilding.org/WMO\\_Region\\_3\\_South\\_America/BRA\\_Brazil/index.html](https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_3_South_America/BRA_Brazil/index.html). Acesso em: 1 dez. de 2022.
- Chowdhury, A.A., M.G. Rasul, and M.M.K. Khanc, (2022). Thermal performance assessment of a retrofitted building using an integrated energy and computational fluid dynamics (IE - CFD). *Energy Reports* 8, 709–717.
- DesignBuilder. Technical CFD Documentation. DesignBuilder, 2022. Disponível em: <https://designbuilder.co.uk/helpv7.0/Content/CFD%20Calculations%20and%20Convergence.htm>.
- Pisello, A. L. et al. (2021). Test rooms to study human comfort in buildings: A review of controlled experiments and facilities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 149, 111359.
- Silva, C. A. da. Análise do escoamento do ar em uma sala cirúrgica via simulação em CFD. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo. 2016.



## Convective heat balance applied to thermal performance analysis of buildings

Letícia Gabriela Eli<sup>1</sup>, Ana Paula Melo<sup>1</sup>, Roberto Lamberts<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratory for Energy Efficiency in Buildings, Federal University of Santa Catarina, Florianópolis, Brazil

### Abstract

This study explored ways to use convection heat balance as a tool to understand in detail building thermal performance. A single-family residential building was used with three types of climatization: naturally ventilated, air conditioner, and hybrid. Building characteristics are related to NBR 15575-1 (ABNT, 2021), and six envelope strategies were applied to understand building heat exchange variations and thermal performance. Results showed that convective heat balance could be applied as a method for thermal performance analysis, but cases with natural ventilation still need an indicator.

### Introduction

Building's thermal performance results from heat exchanges among constructive systems, room air, and internal heat gains from people, lights, and equipment (Spitler, 2019). The sum of all the heat exchanges is equal to zero, and it is known as heat balance. It is directly responsible for heating or cooling demand in indoor environments during a specific period. Then, thermal and energy performance studies can use the heat balance method to understand these heat exchanges and improve thermal building analysis.

Three heat exchanges happen in buildings: conduction, radiation, and convection. The first one, conduction, occurs exclusively on solids such as walls, floors, and roofs. Radiation happens through electromagnetic propagation in space. Finally, convection is related to fluids and occurs in buildings, especially between surfaces and air. Due to interaction with air, convective heat exchanges directly impact a building's cooling and heating consumption.

Melo et al. (2015) analyzed convective heat balance in a commercial building to examine whether insulated envelopes were responsible for increasing cooling demand in hot climates. The authors divided the heat balance into nine categories: HVAC (cooling load), walls, windows, floor, roof, lights, infiltration (outdoor air), people, and equipment. Hot climate results indicate that an insulated envelope is responsible for adding more heat to the air than cases without insulation. Ballarini and Corrado (2012) also applied heat balance to understand the effect of an envelope with thermal insulation on an office and a residential building cooling demand. Heat

balance was divided into two main categories: the heat flow related to the envelope and the heat flow not related to the envelope. These two categories indicate whether the envelope is the most critical part of the whole building's energy performance in summer. Heat balance showed that residential buildings' envelope has a more significant impact on cooling demand than office buildings' envelope. Thus, a sensitivity analysis was applied in cases with a residential typology to understand which envelope part is important for building cooling demand. This analysis showed that transparent surfaces (size, thermal and solar parameters) are responsible for increasing cooling energy during summer periods. Eli et al. (2021a) studied residential buildings' thermal performance with two climatization: naturally ventilated and mixed-mode (i.e., hybrid). Three Brazilian climates were adopted. Thermal balance was applied to two pairs of cases to understand the results of thermal performance indicators. This analysis improved the author's assumptions, as natural ventilation instead of a mechanical system removed energy from the air.

The three studies mentioned in the introduction used EnergyPlus for simulation. EnergyPlus is a building simulation tool widely used for energy and thermal performance analysis and provides necessary outputs to understand a room's convective heat exchanges. According to this brief introduction, this study shows how to use convective heat balance to understand a building's thermal balance. EnergyPlus (22.2) and the computational language R (Version 4.2) were used.

### Simulation

#### Convection Heat Balance on EnergyPlus

Convective heat exchanges occur when a surface or an internal load (e.g., people) tries to reach thermal equilibrium between its temperature and air temperature. When thermal equilibrium is satisfied, the sum of all heat exchanges equals zero. Equation 1 above describes a room's indoor heat balance during any period.

$$Env + IL + NV_{zt} + NV_{out} + TL = 0 \quad (1)$$

Where *Env* represents the heat flux by convection between inside surfaces and room air *IL* is the heat added by internal gains (e.g., people, lights, and equipment). *NV<sub>zt</sub>* and *NV<sub>out</sub>* are the heat exchanges that occur by natural ventilation, where *NV<sub>zt</sub>* is the exchange between adjacent zones and *NV<sub>out</sub>* is by outdoor air. *TL* is the

thermal load removed (cooling) or added (heating) to the air by a mechanical system. Table 1 shows variables used in this work with a description and EnergyPlus output related. EnergyPlus divides variables NVzt, NVout, and TL into gains and losses. AFN Zone Mixing Sensible Heat Gain Rate, AFN Zone Ventilation Sensible Heat Gain Rate, and Zone Air System Sensible Heating Rate are related to heat added to the air. AFN Zone Mixing Sensible Heat Loss Rate, AFN Zone Ventilation Sensible Heat Loss Rate, and Zone Air System Sensible Cooling Rate are related to heat removed from the air. These outputs need to be multiplied by -1 in Equation 1. Another output that needs to be multiplied by -1 in Equation 1 is Surface Inside Face Convection Heat Gain Rate.

Table 1: Convective heat exchanges on EnergyPlus.

Heat exchange	EnergyPlus output
Env (positive or negative) It is obtained for each surface. If negative, it indicates heat is transferred from the surface into the room air.	Surface Inside Face Convection Heat Gain Rate [W]
IL (positive) It is obtained for each thermal zone. Always positive indicates the amount of heat added to the indoor air due to internal sources such as lighting, people, and equipment.	Zone Total Internal Convective Heating Rate [W]
NV <sub>zt</sub> (positive or negative) It is obtained for each thermal zone. EnergyPlus provides two variables to refer the heat loss and heat gain. The variable "gain" refers to the amount of heat added to the air by airflow from another zone.	AFN Zone Mixing Sensible Heat Gain/Loss Rate [W]
NV <sub>out</sub> (positive or negative) It is obtained for each thermal zone. EnergyPlus provides two variables to refer the heat loss and heat gain. The variable "gain" refers to the heat added to the air by airflow from outdoors.	AFN Zone Ventilation Sensible Heat Gain/Loss Rate [W]
TL (positive or negative) It is obtained for each thermal zone. EnergyPlus provides two variables for referring to the cooling and heating thermal load. Cooling refers to the heat removed from the air by a mechanical system.	Zone Air System Sensible Heating/Cooling Rate [W]

### Case study

Figure 1 shows the single-family house used in this study. Variations in user behavior related to climatization and building envelope were considered. For user behaviors, it was considered: naturally ventilated, air conditioner, and hybrid. In naturally ventilated user behavior, windows are operable during the room's occupation. In an air conditioner, when there is occupation, but the operative temperature reaches 26 °C or 18 °C, the ideal load starts to count thermal loads for maintaining air temperature at 21 °C for heating and 23 °C for cooling. These user

conditions are from NBR 15575-1. Hybrid is a mixing of naturally ventilated and air conditioner. When there is an occupation in a room, and the operative temperature reaches 26 °C or 18 °C, the ideal load starts to operate and turns off when the occupation is equal to zero. Hybrid user behavior was modeled through Energy Management System on EnergyPlus (Eli et al., 2021a).

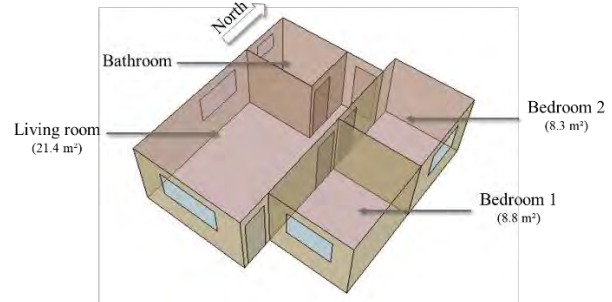


Figure 1: Single-family residential building (adapted from Triana et al. (2015)).

Table 2 shows each strategy applied in this study for building envelope variations. From the reference case, it was applied the strategy described. For example, the Wall case has all the characteristics of the reference case, but the walls are different. Other building characteristics, such as internal loads, and type of glass, come from NBR 15575-1.

Table 2: Envelope variations.

Case name	Description
Reference (base case)	NBR 15575-1's Reference model: Walls: concrete (0,10 m) Roof: Fiber cement roof tile + Air gap (> 0,05 m) + Concrete (0,10 m) Without shading Windows open 45% for ventilation
Wall	Cement board + Glass wool (0,09 m) + Plasterboard (gypsum)
Roof	Fiber cement roof tile + Glass wool (0,09 m) + Air gap (> 0,05 m) + Plasterboard (gypsum)
Ventilation	Windows open 100% for ventilation
Shading	Overhang in all orientations
Combine	Strategies wall, roof, ventilation, and shading combine

Florianópolis-SC was adopted with the TMYx 2007-2021 weather data file (Crawley & Lawrie, 2022). The mean dry bulb temperature from Florianópolis is 21,2 °C.

In addition to results for heat balance, the thermal performance indicator PHFT was analyzed according to NBR 15575-1. PHFT is the sum of occupation hours when the room's operative temperature is between 18 °C and 26 °C (for Florianópolis) divided by the sum of occupation hours. This indicator is obtained to naturally ventilated user behavior. The air conditioner user

behavior and hybrid were analyzed with total thermal load (cooling + heating).

### Discussion and result analysis

This study concentrates on the living room analysis. The living room is occupied between 14h00 and 21h59, with two people until 18h00 and four people until 21h59. Because of this pattern, the living room has more thermal load than the bedrooms. Figure 2 shows the annual convective heat balance for all cases simulated, respecting the total thermal load sequence for air conditioner user behavior.

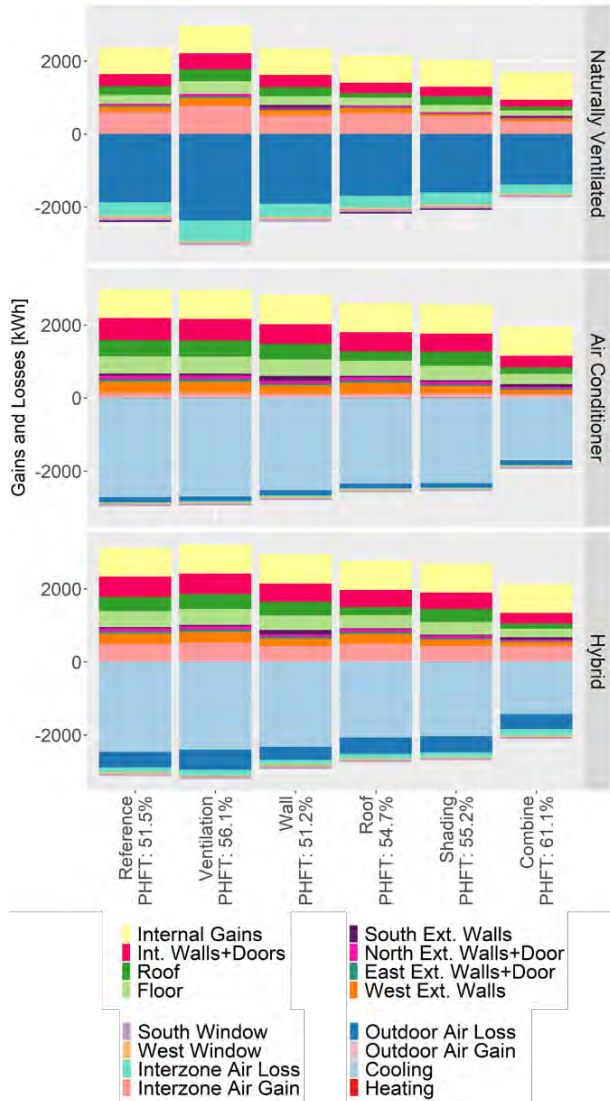


Figure 2: Annual convective heat balance.

Internal gains are the most expressive heat addition to the living room's air for all case variations, followed by internal walls, roof, and floor.

The living room adjacent zones are two bedrooms and one bathroom. The bathroom has constant ventilation through the window, but its door is closed, reducing its ability to decrease its air temperature. In bedrooms, windows cannot be open during the day. Then, these rooms are heated by solar radiation, and there is no effective air renovation, which raises the air and surface temperature.

The roof receives solar radiation directly, which increases external surface temperature and is transferred by conduction to the interior surface. This conclusion is confirmed in the case Roof, when the heat added to the air by the roof decreases when thermal insulation is implemented. The floor surface is a particular case because it is a surface that adds heat to the air, but for the most part, solar radiation enters through windows. Radiation is absorbed, increasing floor temperature, and promoting convection. All the surfaces absorb solar radiation because of definitions in the simulation model. Thus, surfaces convection has the direct impact of solar radiation and, consequently, shows the windows' impact on the room's heat balance. These hypotheses regarding how solar radiation and conduction influence convection can be clarified using a surface heat balance (Eli et al., 2021b). Surface heat balance explores the three heat exchanges. For example, it clarifies whether the convection between air and surface is because of constructive component (conduction) or radiation from other surfaces or solar.

Convective heat balance can be an effective way to understand which part of a building is responsible for changing air temperature. Variations on constructive systems are applied to show how the convective heat balance modifies buildings with different thermal performance indicators values. The results demonstrate that applying thermal insulation in roof construction reduces heat gains from its surface. Building an overhang blocks solar radiation, thus reducing solar radiation absorbed by surfaces. The increased ventilation area improves air exchange in the room, and convection between surfaces and air is more effective than in the reference case. Both strategies enhance the room's thermal performance. When thermal insulation is applied on the external walls, it decreases convective heat gain by these surfaces but increases heat added by the roof. Thus, to enhance thermal equilibrium, convection between air and surfaces is compensated in other ways. Because of this, the living room's PHFT is not improved by changing only the external walls, and other modifications are necessary, such as the combined case shows.

In air conditioner cases, heat exchanges decrease as the total thermal load decreases. Then, in these cases, the convective heat balance can answer the question of which strategy enhances thermal performance mainly because thermal load reduction is the more important achievement in this case. Although cases with hybrid behavior, natural ventilation can increase annual heat exchanges even if the total thermal load decrease, as cases Reference and Ventilation show.

Making decisions based only on convective heat balance for cases with naturally ventilated user behavior is not feasible and requires other thermal performance indicators. For example, Case Ventilation has more significant heat exchanges than Case Reference, but Case Ventilation has a PHFT better than the Reference. The ventilation area is the difference between these two cases, so natural ventilation removes more heat from the air, but

it is possible to see that more heat is added to the air by surfaces. In natural ventilation, the heat balance equilibrium could occur at any temperature, i.e., no temperature setpoint exists. Then, the heat exchanges in naturally ventilated cases show which part of the building is responsible for reaching equilibrium. However, thermal performance indicators are required to decide which strategy enhances thermal performance.

Daily analysis can improve assumptions regarding heat exchanges. Figure 3 presents a daily analysis for Reference cases from days with the maximum dry bulb temperature for the year. During the day, 15h00 and 16h00 are the hours with higher heat exchanges in air conditioner and hybrid behaviors. Occupation starts at 14h00, and operative temperature is higher than 26 °C, as, in the hybrid, the air conditioner is on. In the hybrid behavior, the thermal load starts to be removed when the operative temperature reaches 26°C, while in the air conditioner, it starts when the air temperature is 23°C.

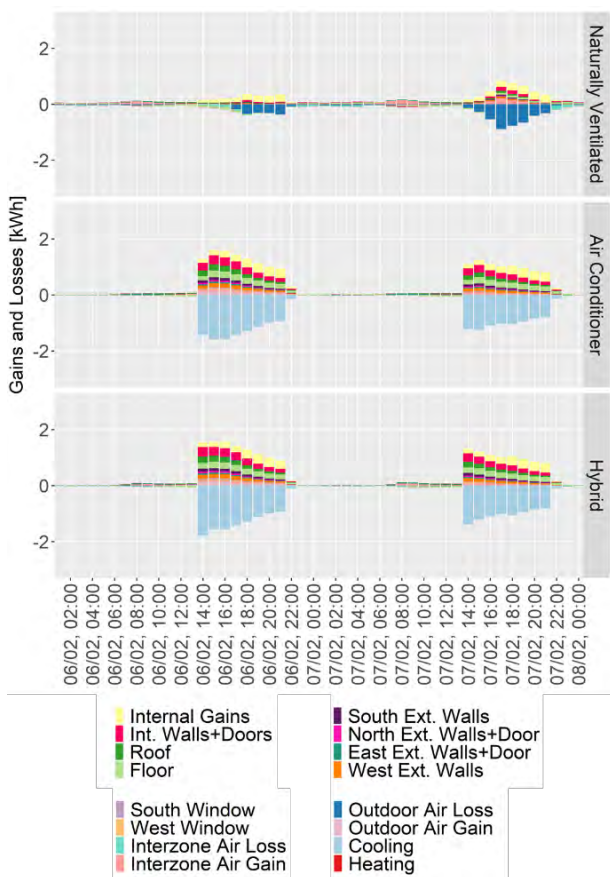


Figure 3: Reference case daily convective heat balance.

Regarding airflow, adjacent zones are responsible for increasing temperature during the day and decreasing at night, especially on naturally ventilated behavior. Bedrooms' doors are open to promote cross ventilation, but results show that thermal performance can be improved if doors are closed during day hours.

### Conclusions

The thermal performance of buildings is directly related to convective heat balance. Some studies used this method

to address thermal and energy building performance as a complementary analysis. Although, more information is required about how to use this methodology. Then, this study shows the convective heat balance method with application in three types of climatization behavior.

Results revealed that thermal performance analysis is improved by convective heat exchanges for buildings with natural ventilation, though other indicators are necessary. Mainly because heat exchanges occur to reach thermal equilibrium, but it does not represent a thermal performance improvement. However, heat exchanges are directly related to the total thermal load in cases with a controlled temperature, as air conditioner use behavior. It is feasible to make decisions based on these results.

This study concentrated only on the house's living room, as living room and bedrooms have different thermal performance responses, especially related to occupation pattern, and assumptions made could not be applied to the entire house. Furthermore, with an annual analysis, it is possible to understand the whole performance, but to define specific strategies for summer or winter, a monthly or daily analysis is necessary.

This work is part of the author's thesis. The following steps enhance the heat balance method (convective and surface) for naturally ventilated buildings, especially related to the connection between heat balance and the building's thermal performance indicators.

### References

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2021). *NBR 15575: Edificações habitacionais - Desempenho. Parte 1: Requisitos Gerais*.

Ballarini, I., & Corrado, V. (2012). Analysis of the building energy balance to investigate the effect of thermal insulation in summer conditions. *Energy and Buildings*, 52, 168–180. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2012.06.004>

Crawley, D., & Lawrie, L. (2020). Repository of free climate data for building performance simulation: Brazil, Region 3 - South America. [http://climate.onebuilding.org/WMO\\_Region\\_3\\_South\\_America/BRA\\_Brazil/index.html](http://climate.onebuilding.org/WMO_Region_3_South_America/BRA_Brazil/index.html)

Eli, L. G., Krelling, A. F., Olinger, M. S., Melo, A. P., & Lamberts, R. (2021a). Thermal performance of residential building with mixed-mode and passive cooling strategies: The Brazilian context. *Energy and Buildings*, 244. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111047>

Eli, L. G., Olinger, M. S., Krelling, A. F., Melo, A. P., & Lamberts, R. (2021b). Análise da eficiência energética da envoltória de edificações residenciais conforme instrução normativa do inmetro (INI-R). XVI ENCAC - *Encontro Nacional de Conforto No Ambiente Construído*, 1213–1222.

Melo, A. P., Lamberts, R., Versage, R. de S., & Zhang, Y. (2015). IS THERMAL INSULATION ALWAYS

BENEFICIAL IN HOT CLIMATE? *Building Simulation Conference*, 1353–1360.

Spitler, J. D. (2019). Thermal load and energy performance prediction. In J. L. M. Hensen & Roberto. Lamberts (Eds.), *Building Performance Simulation for Design and Operation* (Second edi, pp. 13–75). Routledge.

Triana, M. A., Lamberts, R., & Sassi, P. (2015). Characterisation of representative building typologies for social housing projects in Brazil and its energy performance. *Energy Policy*, 87 (December 2014), 524–541. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.08.04>.

## Aplicação de ferramenta computacional no ensino de simulação de desempenho energético

Fernando Simon Westphal<sup>1</sup>, Lucas Adler Rodrigues Procheira<sup>1</sup>,  
<sup>1</sup>Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil

### Resumo

O conceito de eficiência energética tem se tornado cada dia mais comum e debatido. Aos poucos tem sido introduzido juntamente do ensino de arquitetura, passando invariavelmente por processos de simulação computacional. Buscou-se neste artigo apresentar os resultados preliminares de uma investigação sobre o uso de tecnologias no ensino de eficiência energética em arquitetura e urbanismo, utilizando-se de um aplicativo desenvolvido especificamente para este fim. A pesquisa foi efetuada em sala de aula com a aplicação de atividades e um questionário após a finalização. Os resultados demonstraram uma aprovação por grande parte dos alunos juntamente do efetivo auxílio no seu aprendizado. A partir da presente pesquisa foi possível abrir caminho para o aprofundamento de esforços no âmbito do uso de tecnologias no ensino de arquitetura e urbanismo

### Introdução

A simulação de desempenho energético tem se tornado cada vez mais imprescindível para a composição de ferramentas de um bom profissional na área de arquitetura e urbanismo, visto que as matrizes energéticas têm sofrido modificação ao longo dos anos e a inquietação com a otimização energética é algo presente no dia a dia de todos. Vislumbrando esta necessidade de introduzir a simulação de estratégias de eficiência energética à arquitetos em formação buscamos por métodos que possuíssem um fim pedagógico, já que por muitas vezes os simuladores presentes no mercado são demasiado complexos para um aprendizado introdutório ao tema, podendo assim criar um desconforto dos alunos em relação ao assunto.

Casos positivos são encontrados na literatura como o experimento desenvolvido em Harvard (Estados Unidos) ao se aplicar um jogo em uma das aulas com o intuito de estimular as habilidades de simulação dos alunos (Reinhart et al., 2011). Outro caso identificado se deu em Plymouth (Reino Unido) onde o estudo buscou entender como ocorre o processo de simulação ao longo do projeto arquitetônico e sua introdução no currículo escolar (Kumaraswamy & De Wilde, 2015). No Brasil, foi desenvolvida uma experiência educacional para avaliar as vantagens e desvantagens da utilização do BIM (Building Information Modeling) em comparação com o tradicional CAD (Computer-Aided Design) no processo de ensino de projeto arquitetônico por (Lira & Xavier, 2006)

O ensino de eficiência energética tornou-se um ponto motriz da pesquisa, juntamente com a importância da experimentação no processo de aprendizagem (Kolb, 1984). A compreensão dos alunos ao se depararem com uma ferramenta básica, de fácil apropriação e dinâmica, motivou o desenvolvimento de um aplicativo que pudesse ficar disponibilizado *online*, permitindo assim o acesso de todos, com uma base de dados enxuta. Utilizou-se o *software* EnergyPlus™ (NREL, 2022) na sua concepção de desenvolvimento, com resultados pré-definidos para auxiliar no controle das variáveis e aplicabilidade da atividade, sendo possível maior controle nos resultados obtidos pelos alunos, evitando-se falhas eventuais na configuração de modelos customizados.

O objetivo deste tipo de atividade não visa cumprir requisitos de etiquetagens ou normas de eficiência, mas proporcionar uma familiaridade dos alunos com o tema. O intuito é oferecer-lhes as ferramentas para a construção do seu próprio saber, incentivando-os a buscar autonomia no processo de aprendizagem, colocando os professores no local de mediadores do conhecimento, e permitindo que os alunos deem seus próprios significados internos aos conceitos abordados na atividade (dos Santos, 2009). Para tanto foi utilizada uma metodologia que buscasse dinamizar a simulação energética e assim torná-la parte do processo projetual dos alunos. Neste caso, a opção por aprendizagem baseada em projetos (Masson et al., 2012) mostra-se adequada. Utilizou-se elementos já conhecidos para que a partir destes pudesse ser construído um novo conhecimento sobre conceitos adotados nas simulações.

### Método

#### O Modelo Simulado

A partir das reflexões sobre pesquisas anteriores, chegou-se à conclusão de que seria necessário o desenvolvimento de um programa de simples aplicação e com variáveis mais limitadas (figura 1), para facilitar o uso do discente. Os parâmetros escolhidos para que os alunos pudessem ter o melhor aproveitamento possível foram determinados para uma sala fixa (zona térmica), permitindo que o enfoque do aplicativo fosse compreender a dinâmica entre as variáveis, pavimentando conceitos basilares para simulações mais complexas no futuro.



Figura 1: Aplicativo de Simulação desenvolvido

Trata-se de uma sala de 4 x 6 m com pé-direito de 2,70 m. Todas as paredes foram configuradas em alvenaria, sendo uma delas exposta para o exterior e as demais adiabáticas. O modelo foi representado com perfil de uso de escritórios, com climatização artificial. Um total de 1512 casos foi simulado considerando as combinações possíveis de opções de configuração de fachada. Os resultados de consumo de energia alimentaram uma base de dados e uma interface foi desenvolvida utilizando *HTML*, *CSS* e *JavaScript* para que os estudantes pudessem montar opções de fachada e visualizar o consumo de energia correspondente. A interface permite a comparação de duas opções de modelo por vez.

### As Variáveis do Aplicativo

Como apresentado anteriormente o aplicativo desenvolvido foi pautado em minimizar a quantidade de variáveis a serem consideradas, a fim de que pudessem ser bem absorvidas e compreendidas pelos alunos. Foram selecionadas três opções de cidades brasileiras, sendo elas Florianópolis, em Santa Catarina, a cidade onde a atividade foi aplicada, Belo Horizonte, em Minas Gerais e Salvador, na Bahia. A escolha das três cidades foi motivada a fim de que se tenha características climáticas distintas, permitindo que os alunos, ao utilizarem o aplicativo, percebam as influências das demais variáveis em contextos diversos.

A segunda variável apresentada foram os tipos de vidros. Com seis opções, os alunos poderiam escolher entre Fatores Solares de 0,30 a 0,80 com variação de 0,10 a cada item. Ponderando a influência da escolha do vidro em ambientes de escritório a oferta dessas opções teve por objetivo incentivar os alunos a definir a especificação em função de demais características arquitetônicas. O objetivo era demonstrar onde vidros mais ou menos reflexivos podem ter um grande impacto na linguagem desenvolvida para a edificação.

A variável WWR, ou razão de área de janela por parede (do inglês, *window-to-wall ratio*) foi adicionada ao programa, pois influência de diversas formas o projeto, desde o processo de concepção estrutural do edifício, como atendimento a normas contra incêndio (ABNT, 2004) e na linguagem formal pretendida pelos alunos. Foram oferecidas três opções de escolha, 40%, 50% e 60%, que correspondem a frações usuais em projetos de edifícios de escritório, conforme demonstram experiências prévias dos autores.

A quarta opção de alteração talvez seja a mais simples de todas, a orientação da edificação. Para efeitos práticos foram definidas apenas a orientação da fachada aos quatro pontos cardeais principais, permitindo que os alunos rotacionassem o edifício para adaptá-lo à sua preferência. O objetivo era verificar a influência da incidência de sol na eficiência energética das edificações teste.

As duas variáveis finais foram os brises horizontais e verticais, possuindo então três opções de elementos horizontais, tendo a variabilidade de profundidade entre 10, 20 e 30 cm. Os elementos de sombreamento verticais foram definidos com uma profundidade fixa de 30 cm e podendo ser acrescido o número total de aletas entre 4, 6 e 8 unidades. Os elementos de sombreamento possuem uma posição estratégica no programa pois possuem forte apelo na composição arquitetônica, juntamente com sua característica de controle solar.

### Concepção do Método

A atividade ocorreu em uma turma do sexto período, na cadeira de Eficiência Energética e Sustentabilidade em Edificações, do curso de graduação em arquitetura e urbanismo na Universidade Federal de Santa Catarina e contou com a presença de 18 alunos. A atividade que ocorreria em uma aula foi concebida com o intuito de alfabetizar os alunos em conceitos basilares de simulação para eficiência energética em edificações. Buscou-se ser o mais conciso e didático o possível, sabendo que os assuntos tratados podem ser complexos e sobrecarregar parte dos alunos.

A metodologia aplicada teve por objetivo a familiarização dos alunos com a simulação e a fixação de alguns conceitos apresentados em sala de aula em momentos anteriores. A partir de métodos expositivos e atividades práticas a formatação do método escolhido se deu em quatro partes, sendo elas expositiva, atividade prática, discussão de resultados e questionário final.

O primeiro momento da aula foi a apresentação de um modelo expositivo, apenas de conceituação, descrevendo o aplicativo e os conceitos abordados. Em uma segunda parte, o objetivo foi a aplicação da atividade em si, buscando-se relacionar os conceitos com o ato de simular. A terceira parte consistiu na discussão dos resultados em sala de aula, incentivando o debate entre todos os alunos presentes. Por fim, houve a aplicação de um questionário para avaliar como se deu a relação dos alunos com o aplicativo e o impacto no aprendizado dos assuntos abordados.

### Desenvolvimento da atividade

No primeiro momento da aula a ferramenta foi apresentada, explicando-se item por item com a descrição e breve discussão sobre cada variável, a fim de que os alunos pudessem explorar da melhor forma os elementos apresentados. O processo de simulação foi demonstrado, onde o aluno seleciona as opções para as variáveis desejadas, aciona o botão de simulação e um gráfico é apresentado com o valor de consumo de energia em

kWh/ano. Ao selecionar uma nova configuração de variáveis e acionando novamente o botão de simulação um segundo gráfico é apresentado permitindo a comparação dos dois modelos.

Após esta breve demonstração os alunos foram incentivados a desenvolver as atividades no segundo momento da aula.

Na segunda etapa a turma foi dividida em grupos de alunos que deveriam supor um edifício de escritórios e como seria a sua linguagem arquitetônica, utilizando dos elementos presentes no aplicativo. Após uma breve elocubração do exercício e da linguagem arquitetônica disponível, foram dados a eles as palavras e os verbos (variáveis do app) e foi pedido que formassem uma frase com ela (a união das variáveis). A partir de tal especulação imagética, as variáveis seriam selecionadas e o resultado das suas simulações viriam a partir deste primeiro momento. No intermeio desta primeira atividade os alunos foram auxiliados e orientados com o intuito de incentivá-los na produção das suas simulações. Posteriormente, foi solicitado que os grupos buscassem um aprimoramento energético sobre o modelo simulado inicialmente. Ao final da atividade, seguiu-se para a discussão e troca de impressões entre a turma.

O terceiro momento culminou na apresentação dos grupos, buscando uma interação mais espontânea dos alunos. Este momento foi conduzido como uma conversa informal, onde os alunos apresentavam as suas simulações e suas ideias de linguagem arquitetônica. Os resultados foram discutidos por todos, sendo mediados pelo professor e estimulados a compreender o impacto de cada uma das variáveis escolhidas.

Finalmente, os alunos responderam uma breve enquete contendo as seguintes perguntas sobre a utilização do aplicativo durante a aula:

- Como foi seu entendimento sobre eficiência energética?
- Os conceitos utilizados em sala foram claros e de fácil entendimento?
- O uso do aplicativo auxiliou na fixação dos conceitos apresentados em sala?
- O seu entendimento do conteúdo está diretamente ligado à utilização do aplicativo?
- O desenvolvimento ativo da atividade auxiliou na fixação do conteúdo?
- Sem a atividade prática o seu entendimento já estava completo?
- Quais as vantagens e desvantagens da utilização do aplicativo na sua aprendizagem?

As perguntas, desenvolvidas conforme recomenda Malheiros (2011), deveriam ser respondidas com notas de 0 a 10, do menor ao maior grau de satisfação, respectivamente.

## Resultados e Discussão

Após a coleta dos dados apresentados pelos estudantes, juntamente com um diário de pesquisa, onde foram refletidos os processos de ensino e aprendizagem que se deram em sala de aula, os resultados foram avaliados. Observou-se um engajamento muito positivo por parte

dos alunos. A partir das respostas dos questionários é possível notar um melhor entendimento do tema, tendo se cumprido o objetivo da pesquisa. A primeira pergunta apresentada (Como foi seu entendimento sobre eficiência energética?) (figura 02) já demonstrou como se dariam as respostas seguintes.

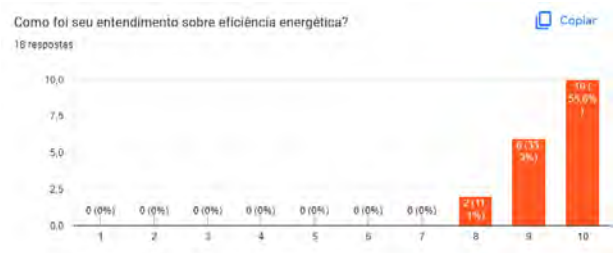


Figura 2: Histograma da Pergunta 01

Para esta pergunta as respostas foram positivas, no sentido de demonstrarem que os alunos em sua maioria possuíam um entendimento do que é a eficiência energética, um passo basilar para que possam compreender os fundamentos de simulação e apliquem no futuro.

A pergunta seguinte (Os conceitos utilizados em sala foram claros e de fácil entendimento?), cujas respostas estão compiladas na figura 03, revelou um excelente grau de entendimento.

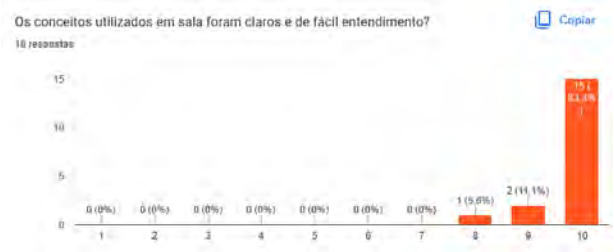


Figura 3: Histograma da pergunta 02

Foi demonstrado que os conceitos foram simples e permitiram a aprendizagem dos alunos no que se refere às bases da simulação de estratégias de eficiência energética. A terceira pergunta objetivou compreender se o aplicativo teve algum impacto consciente aos alunos, a fim de incentivá-los a refletir sobre a significância do método aplicado em seu processo de aprendizagem (O uso do aplicativo auxiliou na fixação dos conceitos apresentados em sala?).

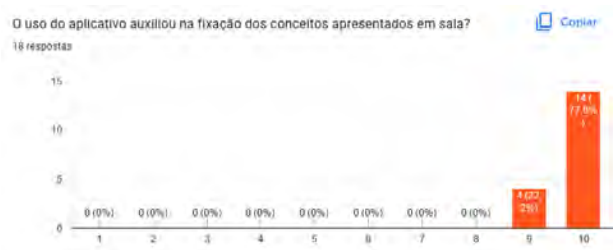


Figura 4: Histograma da pergunta 03

Os resultados apresentados na Figura 4 demonstram que uma grande porcentagem dos estudantes percebeu o



impacto do software em seu aprendizado, apresentando uma possível correlação entre o aprendizado de simulação e a utilização da metodologia ativa em conjunto do aplicativo desenvolvido com o objetivo.

A quarta questão apresentou a primeira grande variação de resultados. Com o intuito de complementar a pergunta anterior, os alunos foram questionados se o entendimento do conteúdo está diretamente ligado à utilização do aplicativo, reforçando ou descartando a tese levantada sobre a correlação do aprendizado da pergunta anterior. (figura 05)



Figura 5: Histograma da pergunta 04

As respostas refletem uma grande variabilidade de percepção entre os alunos (Figura 5), contudo, ainda refletem um resultado positivo para a tese de que a compreensão do fenômeno está correlacionada à metodologia aplicada. A média de 8,3 na escala de 0 a 10 demonstra que a maioria dos alunos viu uma relação entre seu aprendizado e o uso do aplicativo. É necessário realizar mais estudos aprofundados, mas os resultados prévios apresentam uma perspectiva promissora para serem explorados.

Na sequência, a pergunta sobre o desenvolvimento ativo da atividade e a fixação do conteúdo (figura 06) traz novamente a ideia de reflexão para o aluno.



Figura 6: Histograma da pergunta 05

O resultado desta pergunta (Figura 6) reafirma a ideia da conscientização dos estudantes com relação ao aprendizado ativo, onde o aluno participa do seu processo, trazendo significado e internalizando símbolos e conceitos próprios, ancorados no seu repertório para serem utilizados posteriormente em simulações mais complexas.

Na última pergunta objetiva o intuito foi compreender todo o processo abordado, abrangendo de certa forma todas as perguntas anteriores (Sem a atividade prática o seu entendimento já estava completo?) (figura 07).

As respostas obtidas foram as mais variadas de todas as questões, mostrando uma ampla interpretação e reforçando a necessidade de continuar as investigações

como esta pesquisa. Uma média final de 6,8 indica que o uso da ferramenta como eficaz para o aprendizado ainda não pode ser plenamente confirmado.

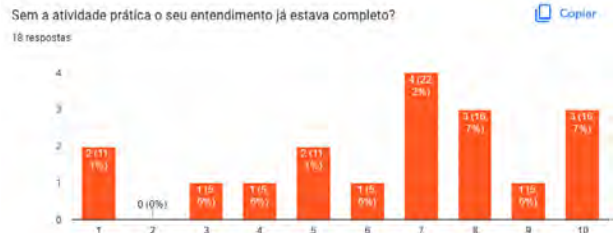


Figura 7: Histograma da pergunta 06

Por fim houve uma pergunta aberta (Quais as vantagens e desvantagens da utilização do aplicativo na sua aprendizagem?) para que os estudantes pudessem demonstrar verbalmente suas perspectivas, críticas ao processo ou itens positivos na metodologia abordada. Os resultados apresentados foram satisfatórios e demonstraram um impacto favorável no desenvolvimento educacional dos alunos. São reproduzidas a seguir, na íntegra, algumas das respostas enviadas:

- "Não vejo desvantagens, e as vantagens são que cada caso nos ajuda a entender melhor o conteúdo de forma mais prática do que a teoria vista em sala."
- "Creio que não há desvantagens. Acredito que pela experiência prática e a experimentação o app só traz vantagens ao aprendizado e fixação do conteúdo."
- "Dá para visualizar melhor os conceitos da eficiência"
- "Praticidade e agilidade na comparação de resultados."
- "O aplicativo ajudou a fixar os conceitos trabalhados nas aulas teóricas."
- "Ajudou na fixação do conteúdo, visto que alguns conceitos estavam um pouco confusos."
- "Acredito que ajuda a compreender melhor a parte prática da disciplina, além de ser uma forma mais prática de testar as possibilidades. A desvantagem seria utilizar o software sem antes compreender a teoria envolvida."
- "Melhor entendimento do conteúdo."

É possível perceber que o método apresentado obteve sucesso ao correlacionar os processos teóricos e práticos ao se utilizar um aplicativo de simulação voltado para o processo de ensino-aprendizagem de conceitos básicos de eficiência energética em edificações.

## Conclusão

É importante ressaltar que a pesquisa foi aplicada em uma turma de Eficiência Energética e Sustentabilidade em Edificações, com 18 alunos presentes durante a sua aplicação, configurando um recorte específico na pesquisa, permitindo um formato diferente do que era apresentado previamente na disciplina, todavia, mantendo o conteúdo programático.

Os resultados obtidos a partir das respostas dos alunos e suas respectivas análises permitiram identificar as fortitudes deste modelo de ensino, como a facilidade de fixação dos conteúdos e a apreensão de conceitos aplicáveis diretamente no processo arquitetônico. De mesma forma foi possível observar algumas deficiências do método aplicado, demonstradas a partir da variância presente nas respostas referentes ao entendimento do assunto, permitindo identificar que o processo pode-se tornar redundante para alguns alunos. Os resultados incentivam, portanto, pesquisas mais aprofundadas sobre a influência dos aplicativos no ensino de simulação para análise de eficiência energética de edificações.

Foi possível identificar, ainda de forma preliminar, a correlação entre o processo de aprendizagem e apreensão dos conceitos com a utilização do aplicativo educacional em conjunto de uma metodologia ativa. As respostas dos estudantes se apresentaram positivas e motivadoras para continuar a perseguir com a investigação do tema. Contudo, os estudos ainda precisam de aprofundamentos para que se possa se comprovar a eficácia do método, visto que os resultados apresentados refletem uma pequena amostra e refinamentos nas aulas são frequentes. O trabalho faz parte de um grande leque de pesquisas a serem viabilizadas. A continuação do mesmo tema pode aprimorar o método e o próprio programa a ser aplicado. Temas como metodologias ativas em arquitetura, influências de aplicativos em outras ramificações do ensino e até mesmo a compreensão dos meios de aprendizagem dos alunos do curso de arquitetura e urbanismo são alguns dos possíveis encaminhamentos identificados a partir da conclusão do presente ensaio educacional.

## Agradecimentos

Este estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior (CAPES)

## Referências

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2004). *ABNT NBR 15200: 2004 – Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio – Procedimento Definições e simbologia*.
- dos Santos, J. C. F. (2009). *Aprendizagem Singnificativa* (2ª Edição). Editora Mediação.
- Kolb, D. (1984). *Experiential learning: experience as the source of learning and development*. Prentice Hal.
- Kumaraswamy, S. B., & De Wilde, P. (2015). *SIMULATION IN EDUCATION : APPLICATION IN ARCHITECTURAL TECHNOLOGY DESIGN PROJECTS. 14th Conference of International Building Performance Simulation Association, Ciat, 2773–2780*.
- Lira, M., & Xavier, V. (2006). *COMPUTAÇÃO GRÁFICA TRIDIMENSIONAL E ENSINO DE ARQUITETURA : UMA EXPERIÊNCIA PEDAGÓGICA*.
- Malheiros, B. T. (2011). *Metodologia da Pesquisa na Educacao* (A. Ramal (ed.); 1ª). LTC Editora.
- Masson, T. J., Miranda, L. F. de, Munhoz Jr., A. H., & Castanheira, A. M. P. (2012). *Metodologia de ensino: Aprendizagem Baseada em Projetos. XL Congresso Brasileiro de Educação Em Engenharia (COBENGE), 2002, 1–10*.
- National Renewable Energy Laboratory (NREL). (2022). *Energy Plus (22.0.0)*. <https://energyplus.net>
- Reinhart, C. F., Dogan, T., Ibarra, D., & Samuelson, H. W. (2011). *LEARNING BY PLAYING-TEACHING ENERGY SIMULATION AS A GAME. Proceedings of Building Simulation*.

## Desempenho térmico de uma HIS no Sul do país: analisando a transferência de calor e o transporte de umidade

Luciane Andreola Beber<sup>1</sup>, Carolina de Mesquita Duarte<sup>1</sup>, Luiza Coutinho Bernardes<sup>1</sup>, Bianca Pereira Lucas<sup>1</sup>, Maritza da Rocha Macarthy<sup>1</sup>, Talita Marini Brandelli<sup>1</sup>, Eduardo Grala da Cunha<sup>1</sup>, Antonio Cesar Silveira Baptista da Silva<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Programa de Pós-graduação de Arquitetura e Urbanismo (PROGRAU), Universidade Federal de Pelotas (UFPel), Pelotas/RS, Brasil

### Resumo

Este artigo analisa o desempenho térmico de uma habitação de interesse social, com paredes de concreto moldadas *in loco*, localizada na zona bioclimática 2. As simulações foram realizadas no *software EnergyPlus 9.1.0*, com dois algoritmos, adotando o sistema de ventilação natural. Na configuração dos modelos foi considerado o vapor dos equipamentos e do chuveiro. A primeira simulação considera apenas a transferência de calor, e a segunda, as transferências de calor e umidade. Os gráficos demonstram que a umidade tem influência no desempenho térmico do edifício, gerando queda maior na temperatura e aumento na umidade, resultando em desempenho insatisfatório.

### Introdução

O déficit habitacional é um problema crescente no Brasil, em decorrência disso foi criado o programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV), atual Casa Verde e Amarela (PCVA), devido a grande demanda essas construções devem ser rápidas e racionalizadas no ponto de vista da escolha dos sistemas construtivos. Por isso, uma das opções muito utilizadas é o concreto moldado *in loco*, em virtude da sua velocidade de execução com a utilização de fôrmas metálicas. Segundo Costa (2013), neste tipo de construção há um grande ganho de produtividade e redução de custos, em função da velocidade na montagem, consequentemente há uma redução de resíduos no canteiro de obras, porém, o uso desse sistema acaba gerando habitações ineficientes. A racionalização e o orçamento reduzido acabam gerando edifícios de baixa qualidade, com um alto consumo de energia e um conforto térmico baixo.

Uma questão determinante para o desempenho satisfatório de uma edificação é uma boa condição de temperatura e umidade, portanto, o conhecimento das propriedades higrotérmicas dos materiais é de suma importância para a escolha adequada das técnicas construtivas aplicadas. Afonso (2018) relata que o aumento na utilização do sistema construtivo com paredes de concreto nas habitações de interesse social, somado à recorrente ocorrência de bolores nestas edificações, traz preocupação quanto ao desempenho dessas habitações.

Um grande aliado que proporciona esse conhecimento é o uso de simulações computacionais, através delas pode-se verificar e avaliar o desempenho do edifício, podendo determinar diretrizes de desempenho mínimo e determinar as características energéticas e físicas da

construção, sendo possível encontrar novos caminhos e opções para melhorar o desempenho das habitações de interesse social. Segundo Mendes (1997), através da simulação computacional é possível avaliar as questões de degradação e deterioração da edificação, e visualizar as condições internas de conforto térmico.

A questão da umidade vem sendo estudada por diversos autores. A norma brasileira NBR 15575 (2021) aborda a estanqueidade, a durabilidade e o desempenho térmico da edificação, mas não faz menção às propriedades dos sistemas construtivos, não considera as transformações dos materiais em relação a umidade, e não estabelece limites e nem valores em relação ao desempenho higrotérmico dos materiais. Por isso, as pesquisas no país sobre as simulações higrotérmicas são prejudicadas, verifica-se a ausência de requisitos e critérios relacionados ao comportamento higrotérmico e às condições de exposição entre os agentes climáticos, ou seja, as exigências quanto ao desempenho térmico restringem-se às características e propriedades térmicas dos materiais dos sistemas construtivos (ZANONI, 2015). Morishita (2020) aborda a importância do estudo sobre a umidade para melhor compreender o desempenho higrotérmico, a fim de contribuir na elaboração de critérios de avaliação nas normas técnicas.

Berger (et al., 2015) destacam que a umidade é uma das manifestações patológicas do edifício, e interfere na qualidade do ar interno das edificações e no conforto dos ocupantes, propiciando o surgimento de fungos filamentosos que afetam a saúde dos usuários. Em relação ao risco de umidade, os sistemas construtivos em nosso país requerem uma atenção especial por causa da baixa qualidade das construções (MORISHITA et al., 2016). A EIA (Agência Internacional de Energia), criada em 1974, discute diversos temas relacionados à energia, sendo um deles a relação da demanda e consumo de energia relacionado a umidade, no documento EBC Anexo 41 - Resposta de todo edifício ao calor e umidade (HENZ, 2013).

Considerando esses argumentos, este trabalho busca fazer um comparativo dos algoritmos utilizados para as simulações realizadas no *software EnergyPlus 9.1.0*, na intenção de avaliar o desempenho térmico de uma habitação unifamiliar de interesse social, analisando o comportamento da temperatura interna do edifício quando considerada de forma conjunta a transferência de calor e a transferência de umidade.

## Objetivo

Este artigo tem como objetivo realizar uma análise de dois algoritmos através da simulação no software *EnergyPlus 9.1.0*, sendo o primeiro utilizando apenas a análise de transferência de calor e o segundo considerando a transferência de umidade e calor de forma simultânea. Para esse fim é apresentada de forma numérica, através de gráficos, a influência da umidade em relação a temperatura interna de uma habitação unifamiliar de interesse social localizada na zona bioclimática 2 (ZB2) com sistema construtivo de concreto moldado “in loco”, possibilitando assim, a averiguação da importância de considerar o transporte de umidade nas simulações higrotérmicas

## Método

A metodologia do trabalho foi desenvolvida em três etapas diferentes: na primeira foram definidos o objeto de estudo e o sistema construtivo utilizados na análise, na segunda foram aplicadas as simulações no software *EnergyPlus 9.1.0*, considerando dois algoritmos distintos e, por fim, na terceira etapa foi realizada a análise dos dados de saída das duas simulações em relação a temperatura gerada no interior do edifício, levando em conta os critérios de transferência de calor e umidade.

## Definição do objeto de estudo

O objeto de estudo definido para este trabalho corresponde a uma habitação unifamiliar de interesse social, localizada na cidade de Pelotas/RS (ZB2). Trata-se de uma edificação térrea geminada no Condomínio Moradas Pelotas I, correspondente a classificação Faixa 2 do PMCMV do governo federal – (BRASIL, 2009). Conforme mostra a Figura 1, a habitação possui 40,48m<sup>2</sup> de área construída, é composta por sala de estar, cozinha integrada à sala, dois dormitórios, banheiro e área de serviço externa.

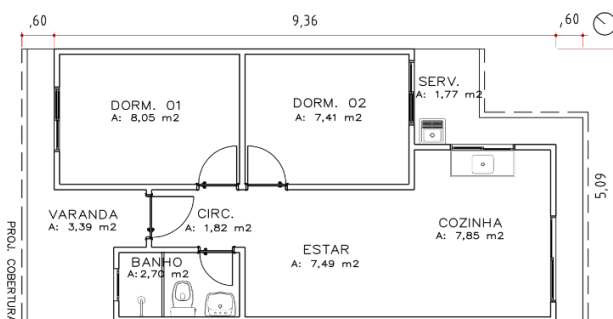


Figura 1: Planta baixa da habitação.

Fonte: Autores, 2022.

A zona bioclimática onde a habitação está inserida se caracteriza por um clima que apresenta as quatro estações bem definidas, com temperatura média de 19,0°C e umidade relativa média de 82,7% (Leitzke et al, 2018).

## Envoltória

O sistema construtivo do edifício é o concreto moldado “in loco”. Todas as paredes externas têm espessura de 10cm, possuem acabamento em massa acrílica texturizada

e pintura externa na cor coral avermelhado. A cobertura é composta por telha cerâmica, estrutura metálica e forro de gesso. No interior da edificação o piso é cerâmico, as janelas e a porta-janela são de alumínio com vidro simples, as portas internas são de madeira, e os dormitórios possuem persianas em PVC.

As propriedades dos materiais que compõem a envoltória foram calculadas de acordo com a NBR 15220-2 (ABNT, 2005), conforme mostra a Tabela 1, com transmitância térmica de 4,40 [W/(m<sup>2</sup>K)] para as paredes de concreto, e 1,94 [W/(m<sup>2</sup>K)] para a cobertura com telha cerâmica.

Tabela 1: Especificações dos materiais da envoltória.

Elemento construtivo	Materiais	Esp. (m)	Condutividade de Térmica (W/m.K)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Calor Específico (J/kg.K)
Parede concreto	Concreto	0,10	1,75	2400	1000
	Reboco	0,03	1,15	2000	1000
Cobertura	Telha Cerâmica	0,1	0,9	1600	920
	Forro Gessc	0,02	0,35	1000	840
Piso	Piso cerâmico	0,01	0,9	1300	920
Esquadrias	Alumínio	0,03	230	270	880
	Vidro Simples	0,03	0,9	-	-

## Simulação do modelo

A modelagem da habitação foi desenvolvida no software *SketchUp 2017* com o apoio do plugin *Legacy Open Studio 1.0.14*, já a configuração e simulação dos modelos foi realizada através do *EnergyPlus 9.0.1*. O arquivo climático utilizado nas simulações para representar a Zona Bioclimática 2 foi o da cidade de Pelotas/RS, elaborado por Leitzke (et al., 2018).

As configurações de ocupação, de taxa metabólica das atividades desempenhadas nos ambientes, de padrão de

uso e de densidade de potência de iluminação, bem como de cargas internas de equipamentos, foram configuradas de acordo com o que preconiza o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais - RTQ-R (INMETRO, 2012). O modelo foi configurado como ventilado naturalmente, com temperatura de setpoint de 25°C, de acordo com Martins (et al., 2009). A temperatura do solo foi configurada a partir do Slab, seguindo o indicado pelo manual da ferramenta (DOE, 2021). A agenda que considera o vapor dos equipamentos da cozinha (panela) e vapor do banheiro (chuveiro) foi configurada com base na Diretriz SINAT N°001 (2016).

### Simulação sem considerar o algoritmo de transporte de umidade

O primeiro algoritmo de condução e convecção (CTF), padrão do *EnergyPlus*, empregado para as simulações dos fluxos de calor, das temperaturas superficiais e do ar interno, e para as análises do balanço térmico das superfícies internas. Neste modelo o algoritmo não considera o transporte de umidade nas paredes (MACARTHY et al., 2022).

### Simulação considerando o algoritmo de transporte de umidade

O segundo arquivo foi configurado com os parâmetros da transferência de calor e umidade (HAMT), também na condição ventilada naturalmente. Os parâmetros preenchidos no *EnergyPlus 9.0.1* foram: *Surface Convection Algorithm: Inside*, *Surface Convection Algorithm: Outside*, *Heat Balance Algorithm*, *Zone Air Heat Balance Algorithm*, *Material Property: Heat and Moisture transfer: Settings*, *Material Property: Heat and Moisture transfer: Sorption isotherm*, *Material Property: Heat and Moisture transfer: Suction*, *Material Property: Heat and Moisture transfer: Redistribution*, *Material Property: Heat and Moisture transfer: Diffusion e Material Property: Heat and Moisture transfer: Thermal Conduction* (MORISHITA, 2020). Os valores desses parâmetros são retirados do programa *Wufi Pro 6.5* através da configuração dos materiais utilizados. Não foi considerada a umidade inicial da construção, devido a limitação do tempo máximo de simulação de 1 ano, no qual não representaria de forma mais real uma edificação construída (DOE, 2021; SOUZA, 2020).

### Análise dos resultados – Dados de saída

Para análise da temperatura interna dos ambientes foram utilizados os dados de saída do *EnergyPlus 9.1.0*: temperatura média do ar e umidade relativa média do ar, do dormitório 1 e do dormitório 2.

## Resultados

Os gráficos abaixo representam os resultados dos dormitórios 1 e 2, da temperatura horária interna e umidade relativa horária interna das simulações, Figuras 2, 3, 4 e 5. As Figuras 6 e 7 são comparativos da temperatura horária interna dos dois ambientes.

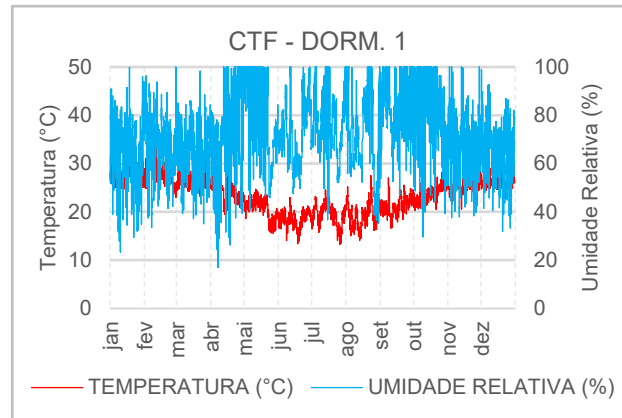


Figura 2: Simulação CTF, Dormitório 1, temperatura e umidade relativa internas.

Fonte: Autores, 2022.

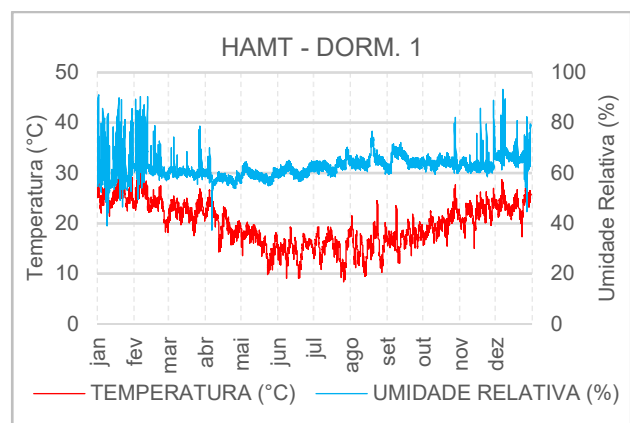


Figura 3: Simulação HAMT, Dormitório 1, temperatura e umidade relativa internas.

Fonte: Autores, 2022.

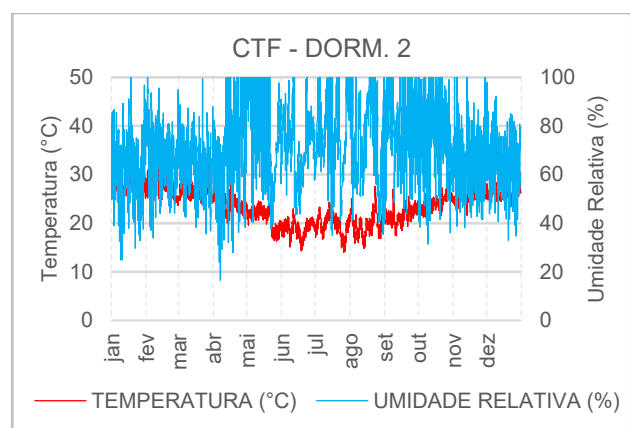


Figura 4: Simulação CTF, Dormitório 2, temperatura e umidade relativa internas.

Fonte: Autores, 2022.

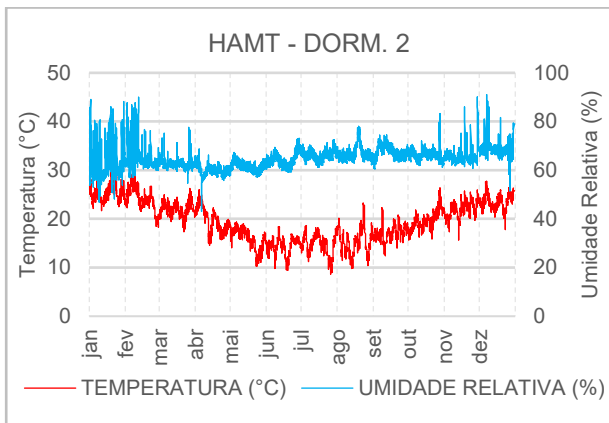


Figura 5: Simulação HAMT, Dormitório 2, temperatura e umidade relativa internas.

Fonte: Autores, 2022.

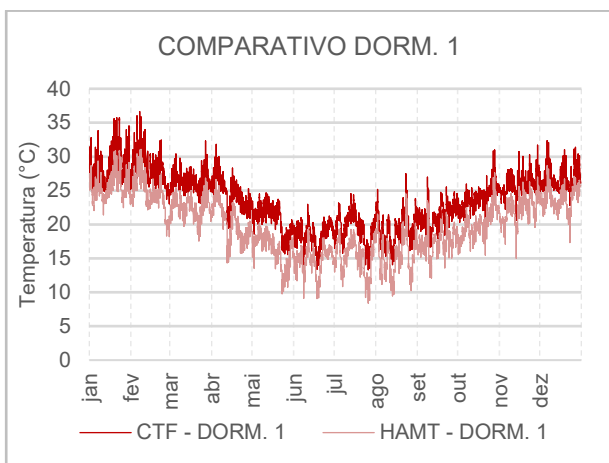


Figura 6: Comparativo das Simulações CTF e HAMT Dormitório 1, temperaturas internas.

Fonte: Autores, 2022.

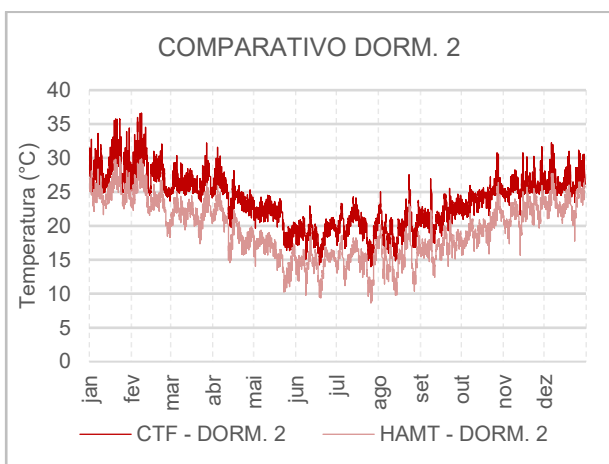


Figura 7: Comparativo das Simulações CTF e HAMT Dormitório 2, temperaturas internas.

Fonte: Autores, 2022.

Nas simulações CTF, nos dormitórios 1 e 2, Figuras 4 e 6, que consideram apenas a transferência de calor, pode-se observar temperaturas médias em torno de 20°C no inverno e entre 20°C e 30°C

As simulações HAMT, nos dormitórios 1 e 2, Figuras 5 e 7, apresentam uma grande mudança na umidade e também na temperatura interna dos ambientes em comparação as simulações CTF, com as temperaturas médias no inverno em torno de 15°C e no verão em torno de 25°C.

Nos gráficos dos comparativos do dormitório 1 e 2, Figuras 6 e 7, observa-se nas simulações considerando o HAMT, que a umidade teve uma grande influência no desempenho térmico da habitação, principalmente no período de inverno, onde se observa a queda de temperatura em torno de 5°C a 6°C entre o modelo apenas considerando a transferência de calor (CTF) em relação ao modelo que considera também a umidade (HAMT). Já no verão, a diferença de temperatura entre as duas simulações é menor, em torno de 2°C e 3°C.

A figura 7 mostra o comparativo da simulação CTF com a simulação HAMT do dormitório 2. Pode-se observar mais claramente a diferença de temperatura entre as duas simulações, onde, a simulação que considera apenas a transferência de calor, a temperatura é mais elevada durante todo período analisado quando comparado a simulação que considera também a umidade. Esse fato pode se dar devido a orientação do dormitório 2, sudeste, contribuindo com uma menor radiação solar nas paredes externas e maior umidade relativa interna.

A umidade nos dois algoritmos apresentou grande influência nos resultados, isso demonstra a importância de considerar o algoritmo da umidade (HAMT) nas simulações higrótérmicas do edifício, pois resulta na queda da temperatura com o aumento maior da umidade, diminuindo o desempenho da habitação

## Conclusões

Pode-se concluir que esse tipo de edificação que utiliza o sistema construtivo de concreto moldado *in loco* não traz um desempenho térmico satisfatório para a zona bioclimática 2 (ZB2). Através da simulação que considera o algoritmo (HAMT), a temperatura interna do edifício diminui no inverno, e a umidade aumenta, pois, alguns fatores como as precipitações de chuva são mais frequentes nessa época do ano, podem acabar influenciando nessa variável.

Analisando as duas simulações podemos concluir que, a habitação foi entregue de modo a possuir um determinado desempenho, porém com o passar do tempo, em função da influência de fatores como as intempéries e a umidade, as propriedades dos materiais empregados podem ter sofrido alterações, o que consequentemente altera o nível de desempenho da edificação como um todo.

E, por fim, com os resultados obtidos pode-se perceber a influência da umidade no desempenho térmico de uma edificação e a importância de se trabalhar a questão da umidade nas simulações, que neste caso foi realizada através do algoritmo (HAMT), que considera a ação da umidade nos materiais que compõem os elementos construtivos das edificações, quando se analisa o seu desempenho térmico. Este artigo possui limitações

relacionadas ao tempo de simulação, limitado a um ano, este período não é suficiente para que a construção atinja a estabilidade de quantidade de água nos materiais, portanto, foi considerada como nula, a quantidade de água inicial da construção, como tentativa de realizar uma simulação que considerasse os demais anos de simulação, e não o primeiro. Outra limitação é relacionada a escassez de referências quanto às propriedades higrotérmicas dos materiais utilizados no país, neste artigo utilizamos um banco de dados europeu para preencher esta lacuna.

## Referências Bibliográficas

- ABNT – Associação Brasileira De Normas Técnicas (2021). NBR 15575: *Edificações Habitacionais Desempenho*. Rio de Janeiro.
- ABNT – Associação Brasileira De Normas Técnicas (2005). NBR 15220: *Desempenho Térmico de Edificações*. Rio de Janeiro.
- Afonso, T. M. (2018). Desempenho higrotérmico de edificações e procedimentos para previsão de ocorrência de bolores em ambientes internos: estudo de caso em habitações construídas com paredes de concreto. *Dissertação de Mestrado pela IPT- Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo* São Paulo.
- Berger, J., Guernouti, S., Woloszyn, M.; Buhe, C. (2015). Factors governing the development of moisture disorders for integration into building performance simulation. *Journal of Building Engineering* 3, 1-15.
- Brasil. Lei nº 11.977, de 07 de julho de 2009. Dispõe sobre o Programa Minha Casa, Minha Vida – PMCMV e a regularização fundiária de assentamentos localizados em áreas urbanas. Brasília, DF.
- Costa, L. J. D. Da (2013). Paredes de concreto moldadas in loco em condomínios horizontais: Avaliação de desempenho pelos usuários. *Trabalho de Conclusão de Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS*. Porto Alegre.
- DOE – United States Department Of Energy (2021). *EnergyPlus Documentation: Input Output References*. US Department of Energy.
- Hens, H S. L. C. EBC (2013). Annex 41 - Whole Building Heat- Air-Moisture Response. United Kingdom. Disponível em: <https://www.iea.ebc.org/projects/project?AnnexID=41>. Acesso em: 13 de jul. 2022.
- INMETRO - Instituto Nacional De Meteorologia, Qualidade E Tecnologia (2012). Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais, *RTQ-R*.
- LABEEE - Laboratório De Eficiência Energética Em Edificações. PROJETEEE. Florianópolis. Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: <http://projeteee.mma.gov.br/componentes-construtivos/>.
- Leitzke, R. K. et al (2018). Optimization of the Traditional Method for Creating a Weather Simulation File: The Pelotas.epw Case. *Journal of Civil Engineering and Architecture* 12, 741-756.
- Macarthy, M.R., Bernarde, S.L.C., Duarte, C.D., Beber, L.A., Grigoletti, G.C., Cunha E.G (2022). Análise comparativa do desempenho térmico em edifício histórico segundo dois algoritmos de cálculo de condução térmica.. Xix Encontro Nacional De Tecnologia Do Ambiente Construído/Conforto Ambiental e Eficiência Energética, *Anais* 19.
- Mendes, N (1997). Modelos para Previsão da Transferência de Calor e de Umidade em Elementos Porosos de Edificações. *Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis*.
- Morishita, C.; Berger, J.; Carneiro, A.; Mendes, N (2016). Issues about moisture in residential buildings of Brazil. *CIB World Building Congress. Tampere University of Technology, Tampere, Finland* 865-884.
- Morishita, C (2020). On the assessment of potential moisture risks in residential buildings across Brazil. *Tese Doutorado em Engenharia Mecânica Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Paraná*.
- Resende, B. C.; Souza, H. A.; Gomes, A. P (2019). Modelagem da transferência de calor de ambientes subterrâneos no programa de simulação EnergyPlus. *Ambiente Construído. Porto Alegre* 19, 1, 161-180, jan./mar.
- SINAT – Sistema Nacional De Avaliações Técnicas (2016). Diretrizes para Avaliação Técnica de Produtos. *Diretriz SINAT 001, revisão 2*. Brasília.
- Sousa, L. R. De (2020). Análise do Desempenho Térmico de Habitações Multifamiliares de Interesse Social com Paredes Verde. *Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ouro Preto – Ouro Preto*.
- Zanoni, V. A. G. (2015). Influência dos agentes climáticos de degradação no comportamento higrotérmico de fachadas em Brasília. [s.l.] *Universidade de Brasília*.

## Internal Convection Algorithm Impact on Thermal Comfort Assessment in Office Rooms through Computer Simulation on Energyplus

Mônica Martins Pinto<sup>1</sup>, Fernando Simon Westphal<sup>2</sup>

LabCon – Laboratório de Conforto Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, <sup>1</sup>monicamartinspinto@outlook.com, <sup>2</sup>fernando.sw@ufsc.br

### Abstract

A critical point in buildings' heat transfer modeling is the convective heat transfer, since it involves complex correlations. Several studies compare convection models with in-loco measurements, but few do so in the context of computational simulation in EnergyPlus and thermal comfort conditions. The present study verified the impact of the convection algorithm on the internal surfaces on the thermal comfort of an office room through simulation in EnergyPlus. Three algorithms were compared: TARP (default), Adaptive, and Simple Natural. Simple Natural tends to underestimate thermal discomfort conditions. This algorithm showed 14% more hours of the year in comfort compared to Adaptive. TARP and Adaptive presented similar results.

### Introduction

Building performance simulation (BPS) tools enable researchers to investigate the performance of systems and materials and designers to assess the influence of their choices. The EnergyPlus software is the most widespread BPS tool nowadays.

Based on input data related to the local climate, building geometry, properties of the materials used, technical specifications of the installed systems, building occupancy and use patterns, EnergyPlus estimates thermo-energetic performance of the building. The thermal performance of a building or environment depends on the resulting thermal balance between all forms of heat transfer (radiation, convection, and conduction). The air's thermal balance in a volume-controlled zone is the sum of heat transfer by convection (through surfaces and internal heat sources), infiltration and ventilation, air exchange with other zones, and the demand of the air conditioning system.

Peeters, Beausoleil-Morrison, and Novoselac (2011) state that convection heat transfer is a critical point in buildings' heat transfer modeling since it involves fluid mechanics and presents more complex correlations. According to Beausoleil-Morrison (2021), establishing the appropriate value of the convection coefficients is essential to model the interior surfaces' convection. This coefficient varies from surface to surface and flow regime and may differ

over time. Several authors emphasize the significant sensitivity of the variation of internal surfaces convection algorithm in the thermal performance simulation (Batista 2011; Batista, Lamberts, and Güths 2011; Beausoleil-Morrison 2002; Peeters, Beausoleil-Morrison, and Novoselac 2011).

A study by Clarke (1991) apud Peeters, Beausoleil-Morrison, and Novoselac (2011) found a significant impact on the thermal comfort prediction in a high-glazed residential building in the United Kingdom when applying different convection heat transfer models. The variation in the PPD reached 42%.

Batista, Lamberts, and Güths (2011) studied the influence of conduction and convection algorithms available in EnergyPlus in the thermal behavior of a naturally ventilated residence during summer in Florianópolis. The study tested the convection algorithms TARP, Adaptive and Simple Natural, as well as combinations between them depending on the type of surface (wall, ceiling, or floor). The Simple algorithm showed lower deviations concerning surfaces and air temperatures measured in loco. All simulated combinations overestimated the sum of degree hours for cooling by up to 78% (TARP). The mixture of Simple on the walls and Adaptive on the floor and ceiling showed the lowest deviation, with 44% more hours in discomfort than estimated through measurements.

Afterward, the author estimated the forced convection coefficients based on in-loco air velocity measured data. Subsequently, they compared these values to the coefficients calculated by EnergyPlus (Batista 2011). Although the surface and air temperatures with Simple on the walls and Adaptive on the floor and ceiling showed less deviation from the measurement data, TARP and Adaptive obtained the best correlation with the estimated forced convection coefficients.

Despite several studies comparing convection models with in-loco measurements, few studies make this comparison in the context of simulating thermal performance in EnergyPlus and approaching its impact on thermal comfort conditions.



In EnergyPlus, you can choose from five algorithms for calculating the internal surface convective heat transfer coefficient ( $h_{c,i}$ ) (U.S. Department of Energy 2022a).

**TARP:** natural convection model using Walton's equations (Walton 1983). It determines the convection coefficient based on one of three equations, depending on the slope of the surface and the temperature gradient between the surface and the thermal zone air (U.S. Department of Energy 2022b). This algorithm is the default in EnergyPlus.

**Simple Natural Convection Algorithm (SimN):** determines constant coefficients for each surface, according to its inclination. These coefficients were also obtained directly from Walton (Walton 1983; U.S. Department of Energy 2022a; U.S. Department of Energy 2022b).

**Adaptive Convection Algorithm (Adap):** it is a dynamic model. The software selects the convection coefficient equation on each surface according to the flow regime and its orientation. The algorithm considers 45 surface categories and 29 possible equations for  $h_c$ . Beausoleil-Morrison (Beausoleil-Morrison 2000; Beausoleil-Morrison 2002) developed this methodology, but it continues to be expanded in EnergyPlus as new research is developed (U.S. Department of Energy 2022a; U.S. Department of Energy 2022b).

**Ceiling Diffuser:** convection coefficient is calculated based on ambient air exchange (ACH), according to Fisher and Pedersen equations (Fisher and Pedersen 1997), depending on the surface type. However, these equations are used only when the air exchange is  $ACH \geq 3.0$ . If  $ACH \leq 0.5$ , TARP is selected. If  $0.5 < ACH < 3.0$ , the software interpolates the value calculated by both. This algorithm is indicated for environments with air conditioning systems with air outlets positioned on the ceiling (U.S. Department of Energy 2022a; U.S. Department of Energy 2022b).

**ASTMC1340:** This algorithm is based on ASTM C1340 (ASTM 2015) and is specific for simulating heat flows in attics (U.S. Department of Energy 2022b).

These algorithms include equations for diverse conditions according to surface orientation, airflow conditions, and heat flow direction. In the Adaptive algorithm, they also comprehend different models for the same conditions. In EnergyPlus documentation, the authors claimed that stating which of these methods is the best or most correct is not possible (U.S. Department of Energy 2022a).

In this context, the present study aims to verify whether the choice of convection algorithm on internal surfaces in thermal performance simulation in EnergyPlus significantly impacts the prediction of thermal comfort in office environments, conditioned and without natural ventilation.

## Method

### Office model

An office room model with a  $24\text{m}^2$  floor area and a single external wall (4 meters wide), in which a window occupies 60% of the façade, was considered (Figure 1). The model was rotated in four solar orientations: North, South, East, and West. The room also has a plenum area, i.e., a space between the slab and the ceiling acting as the air condition return air path. The floor is 30m high, equivalent to a tenth floor.

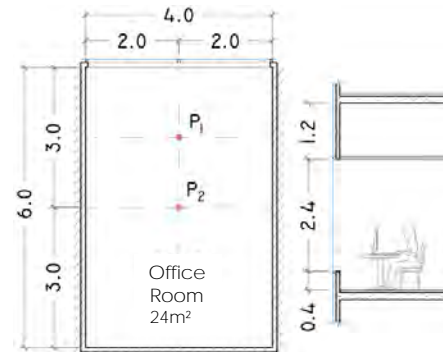


Figure 1: Office model floor plan and section [m].

Internal loads are defined by occupancy density of  $11.6\text{ m}^2$  per person, equipment density of  $7.44\text{ W/m}^2$ , and lighting power density of  $10.6\text{ W/m}^2$ , based on Chapter 18 of the ASHRAE Fundamentals Handbook (ASHRAE 2017). A metabolic rate of  $126\text{ W/person}$  was established, equivalent to sedentary office activity according to chapter 9 of the same document (ASHRAE 2017). The people's clothing insulation estimation applied the dynamic method of ASHRAE Standard 55 (ASHRAE 2020). This method defines the clothing insulation of a representative occupant as a function of the outside air temperature at 6 am. The resulting values were calculated directly by the EnergyPlus software.

Figure 2 shows the routines for using the room's systems, which are unoccupied during the weekend. During periods without occupancy, 5% of the lighting and equipment were on. The activation of artificial lighting is static, i.e., it does not consider the availability of natural lighting.

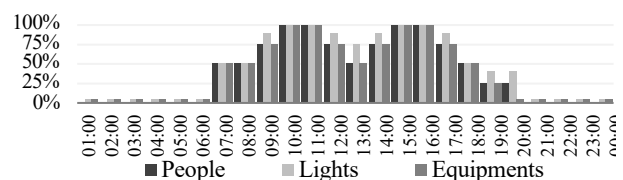


Figure 2: Workdays schedules.

The room is conditioned by a direct expansion system of PTHP type (Packaged Terminal Heat Pump), the equivalent of using a Split device, with COP 3.0 W/W. The thermostat is set to start heating under  $21^\circ\text{C}$  and cooling above  $24^\circ\text{C}$ . Air conditioning operates from 7 am to 9 pm, with capacity sizing varying according to simulation data, and remains deactivated at the weekend.

Table 1 presents the thermal properties of the envelope. The model does not consider any internal or external shading devices. The interior walls, floor, and roof were configured as adiabatic (Pinto and Westphal 2022b), assuming the same thermal conditions in the adjacent rooms. The façade wall is covered by the same type of glass used in windows, representing a fully-glazed façade.

Table 1: Envelope thermal properties

<b>External walls</b>	Light steel framed wall; U-value = 0,77 W/m <sup>2</sup> K; Solar absorptance = 0,297.
<b>Interior walls</b>	Light steel framed wall; U-value = 0,69 W/m <sup>2</sup> K; Solar absorptance = 0,297.
<b>Ceiling</b>	Gypsum board; U-value = 1,40 W/m <sup>2</sup> K; Solar absorptance = 0,297.
<b>Slab</b>	Concrete slab and ceramic floor; U-value: 2,74 W/m <sup>2</sup> K; Solar abs. floor=0,418, ceiling=0,297.
<b>Glass</b>	Selective glazing 8mm; Tsol = 0,41; Rsol <sub>out</sub> = 0,17; ε = 0,89; U-value = 5,56 W/m <sup>2</sup> K; SHGC = 0,51

The analysis considered the temperate climate of Florianópolis, which is a Cfa classification on the Köppen-Geiger climate scale, and presents well-defined seasons, continuously humid, and hot summers (Kottek et al. 2006).

### Computer simulation and convection algorithms

Computational simulations used the software EnergyPlus version 9.6.0. The SWERA climate file for Florianópolis, “BRA\_Florianopolis.838990\_SWERA.epw”, available in the EnergyPlus climate file library (DOE 2017), was used as input climate data.

The present study investigated sensitivity to the convection algorithm on internal surfaces. External surfaces were not tested, keeping the default software configuration.

Three of the five algorithms available in EnergyPlus are relevant to the studied room. The room has a PTHP air conditioning system, in which the evaporator units are installed on the walls, not fitting the indication for the Ceiling Diffuser algorithm. The ASTM1340 algorithm is also not suitable, as it is specific to simulate heat flows in attics. Therefore, the study compared the use of the TARP, Simple Natural, and Adaptive algorithms.

The Adaptive algorithm always detected the airflow regime in the thermal zone as “Simple Buoyancy” (natural). All the walls followed the equations of Fohanno and Polidori (2006), the floor and roof followed the equations of Alamdari and Hammond (1983), depending on whether the thermal situation is stable or fluctuating, and the window followed ISO 15099:2003 (ISO 2003).

### Output data under analysis

The surface convection algorithms calculate the convection coefficient on each surface and timestep. The convection contribution to the air thermal balance is a function of this coefficient. Therefore, prior to analyzing the algorithm's impact on thermal comfort, the convection coefficient ( $h_c$ ) estimated with different algorithms was verified. The analysis considered one week of summer

and one week of winter. The weeks were defined based on the extreme summer and winter weeks established by the climate file: February 19th and 23rd, and September 3rd and 7<sup>th</sup>, respectively.

Thermal comfort analysis assumed two points in the room. The first is located 1.5m far from the window, and the second in the room center, indicated by the P letter in Figure 1. The analysis employed PMV and PPD, the thermal comfort model from Fanger (1970), considering only the occupied period. The indexes were corrected according to the SolarCal solar adjustment model and chosen based on a study by Pinto and Westphal (2022a).

In addition to hourly PMV data, the annual analysis of thermal comfort applied the TCA (thermal comfort availability) metric (Atzeri et al. 2016). TCA establishes the availability of sufficient thermal comfort during the occupied time at a point in the room. Acceptability ranges followed the lead thermal comfort standards (ISO 2005; EN 2019; ISO 2017; ABNT 2008; ASHRAE 2020), with PMV between  $\pm 0.5$  and a maximum PPD of 10%. The hourly thermal comfort data was also analyzed in more detail in the two representative weeks.

### Results analysis

Figure 3 shows convective heat transfer coefficients calculate by each algorithm at hourly basis. The temperature at inside face of the exterior wall is plotted for comparison.

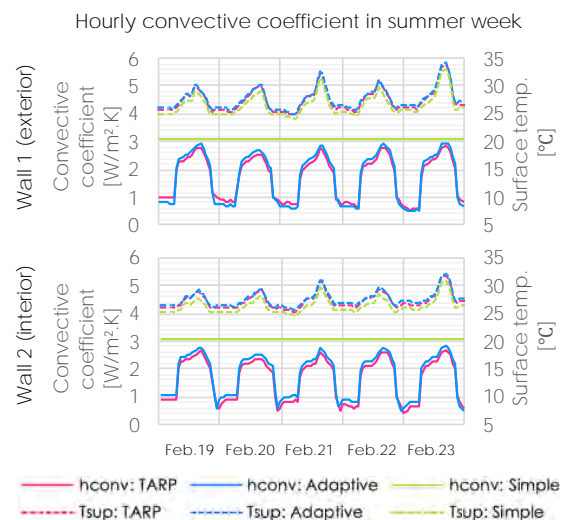


Figure 3: Hourly convective coefficient and indoor temperature of two walls in summer week: West

The fixed coefficient of the Simple algorithm is constantly higher than the coefficients estimated with the other algorithms, varying up to 2.70 W/m<sup>2</sup>.K. The coefficients calculated with TARP and Adaptive follow a similar pattern, with hourly differences up to 0.31 W/m<sup>2</sup>.K. Note that this variation slightly impacts the temperature of these surfaces. With the Simple algorithm, the surface temperature remained between 0.2 and 1.5°C lower than the other algorithms. Between TARP and Adaptive, this difference did not exceed 0.5°C.

The PMV and PPD were analyzed using histograms of the relative frequency of occurrence of hourly difference confronting the use of different convection algorithms on the internal surfaces. TARP algorithm was the reference ( $\Delta PMV = PMV_{i,j} - PMV_{TARP}$ ). The results were similar for each solar orientation, and Figure 4 presents the results for the West façade model. Regardless of the position in the room, Adaptive and Simple Natural algorithms showed an hourly difference of up to 0.2 on the PMV scale compared to TARP.

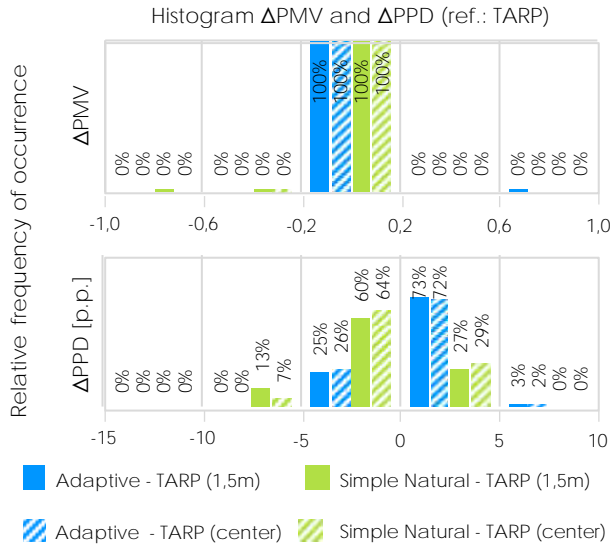


Figure 4: Relative frequency of occurrence of the hourly difference of thermal comfort. Reference: TARP.

Observing the PPD histograms, there is a tendency for the Adaptive to predict higher discomfort than the TARP. This difference was up to 5 p.p. (percentage points) between 82% and 92% of the occupied period. The Simple Natural models presented differences between -5 p.p. and +10p.p. compared with TARP. The annual availability of thermal comfort was also analyzed using the annual TCA metric based on the PMV index. Figure 5 presents results for models with exterior wall faced to West. The maximum difference occurs at the point 1.5m distant from the window between Adaptive and Simple Natural (14 p.p.). A difference of 14% of time represents a month and a half in the building occupancy. When using building simulation for energy regulations, such a difference is even more important. In this case, the choice for the convection algorithm can change significantly the thermal comfort evaluation.

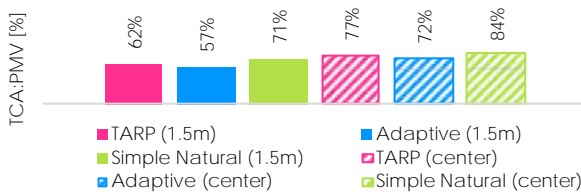


Figure 5: Annual thermal comfort availability:  $TCA_{+, -, \pm 0.2}$ : West.

Given this divergence between the hourly histogram and the annual availability of thermal comfort, two weeks were analyzed to understand what happens on the hourly scale. This analysis also utilized the West-oriented model and the point at 1.5 m from the window. Figure 6 presents the daily PMV profiles comparing the three convection algorithms.

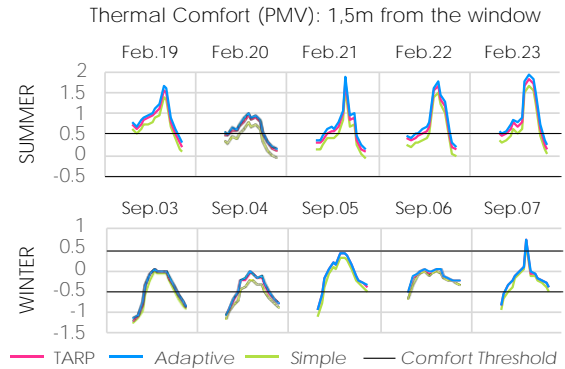


Figure 6: Thermal comfort (PMV at 1.5m from the window: extreme weeks of summer and winter: West

The model with the Simple algorithm tends to predict a colder comfort condition than the others in both weeks, with the highest differences between Simple and Adaptive. The hourly difference was low, following Figure 4. The maximum difference was 0.3 on the PMV scale in these periods. Between TARP and Adaptive, the discrepancy remains below 0.1 in most hours.

The TCA indicator applies fixed comfort threshold and their fulfilment in each hour of the established period. A PMV difference of 0.1 is sufficient to change the condition at that time (within or exceeding the comfort limit). We can see in Figure 6 that the comfort profiles exceed or remain close to the comfort limits (PMV between 0.5 and -0.5) at different hours.

Table 2 transcribe the PMV values for the summer week. Shaded cells highlight the hours when at least one algorithm resulted in PMV up to 0.5 and another algorithm is higher than this limit, i.e., when there is discrepancy in thermal comfort qualification by the algorithms. In these situations, cells shaded green means that model is within comfort conditions and red means discomfort. The frequency of hours in a week in which a reduced variation in PMV resulted in a divergent thermal comfort condition is verified (approximately 27% of the hours occupied). Therefore, even with narrow divergences in hourly scale, the choice of the internal surfaces' convection algorithm may significantly interfere with the comfort condition prediction at a point in the room at a given moment. As a result, annual thermal comfort availability in a room differs significantly depending on the chosen algorithm.


Table 2: Hourly PMV (summer week, West, 1.5m from the window).


	Feb.19 <sup>th</sup>			Feb.20 <sup>th</sup>			Feb.21 <sup>st</sup>			Feb.22 <sup>nd</sup>			Feb.23 <sup>rd</sup>		
	T	A	S	T	A	S	T	A	S	T	A	S	T	A	S
08:00	0.8	0.8	0.7	0.5	0.6	0.4	0.3	0.4	0.2	0.4	0.5	0.3	0.5	0.6	0.4
09:00	0.6	0.7	0.5	0.5	0.6	0.3	0.3	0.4	0.2	0.3	0.4	0.2	0.5	0.5	0.3
10:00	0.8	0.8	0.6	0.6	0.7	0.5	0.4	0.5	0.2	0.4	0.5	0.3	0.5	0.6	0.4
11:00	0.9	0.9	0.7	0.6	0.7	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.5	0.3	0.6	0.7	0.5
12:00	0.9	1.0	0.8	0.7	0.8	0.5	0.6	0.7	0.4	0.5	0.6	0.4	0.8	0.9	0.6
13:00	1.0	1.0	0.8	0.8	0.9	0.6	0.6	0.7	0.4	0.6	0.7	0.4	0.7	0.8	0.6
14:00	1.0	1.1	0.9	0.9	1.0	0.8	0.7	0.8	0.5	0.7	0.8	0.5	0.8	0.9	0.6
15:00	1.1	1.2	1.0	0.8	0.9	0.7	1.0	1.1	0.8	1.5	1.6	1.4	1.7	1.8	1.5
16:00	1.6	1.7	1.4	0.9	1.0	0.7	1.8	1.9	1.6	1.7	1.8	1.5	1.8	2.0	1.7
17:00	1.5	1.6	1.3	0.8	0.9	0.6	0.9	1.0	0.7	1.4	1.5	1.2	1.7	1.8	1.5
18:00	0.8	0.9	0.7	0.5	0.6	0.4	0.9	1.0	0.8	1.2	1.3	1.0	1.4	1.5	1.2
19:00	0.5	0.6	0.4	0.3	0.4	0.2	0.4	0.5	0.2	0.5	0.6	0.4	0.6	0.7	0.5
20:00	0.3	0.4	0.2	0.2	0.2	0.0	0.2	0.2	0.0	0.2	0.3	0.1	0.3	0.4	0.1
21:00	0.2	0.3	0.1	0.1	0.2	0.0	0.1	0.2	-0.1	0.1	0.2	0.0	0.2	0.3	0.0

T: TARP

A: Adaptive

S: Simple Natural

 Within thermal comfort threshold

 Outside thermal comfort threshold

## Discussion

The models with Simple Natural algorithm tended to colder thermal conditions and, in addition, calculated convection coefficients constantly higher than the other algorithms. Therefore, the higher the estimated convection coefficient, the greater the tendency towards colder environments and the greater availability of thermal comfort throughout the year in a temperate climate with predominant demand for cooling.

It was also understood that the Adaptive approach would be more effective in a hybrid conditioning situation. For example, it is occasionally conditioned with an HVAC system, sometimes with natural ventilation. In the case of the office object of this study, which operates an HVAC system throughout the occupation period, and without significant airspeed, the EnergyPlus adaptive algorithm always selected the same calculation model for the given surface. However, it is worth emphasizing that the model was not the same one used in TARP.

## Conclusion

The present study verified the impact of the choice of the convection algorithm on the internal surfaces in the simulation of the thermal conditions of an office room model through simulation in EnergyPlus. The analysis compared the employment of three algorithms: TARP (software default), Adaptive and Simple Natural.

The results indicated a tendency to underestimate thermal discomfort conditions when applying the Simple Natural algorithm. In one of the comparisons, the model configured with Simple Natural presented 14% more hours of the year in comfort than with Adaptive. This algorithm defines fixed values for the convection coefficient according to the surface inclination.

The TARP and Adaptive algorithms resulted in similar thermal comfort conditions. The Adaptive algorithm seems relevant to situations, or rooms, with higher thermal variability, especially concerning air velocity, such as when hybrid conditioned. Even so, it is suitable to

simulate fully-conditioned rooms with negligible airspeed.

More studies correlating simulation results with field measurements are necessary to establish the most accurate algorithm for the simulation of an office room model in a temperate climate. However, the analyses described in this study warn that the choice of the internal surfaces' convection algorithm may significantly impact the prediction of thermal comfort conditions, even in temperate climates and thermally controlled environments.

## Acknowledgement

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001.

## References

- ABNT (2008). *ABNT NBR 16401-2 Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários parte 2: Parâmetros de conforto térmico*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Alamdari, F., and G. P. Hammond (1983). Improved data correlations for buoyancy-driven convection in rooms. *Building Services Engineering Research & Technology* 4(3). <http://doi.org/10.1177/014362448300400304>.
- ASHRAE (2017a). *ASHRAE Handbook Fundamentals*. ASHRAE Inc.
- ASHRAE (2020). *ANSI/ASHRAE Standard 55: Thermal environmental conditions for human Occupancy*. ASHRAE Inc.
- ASTM (2015). *ASTM C1340-04: Standard practice for estimation of heat gain or loss through ceilings under attics containing radiant barriers by use of a computer program*. ASTM International. <http://doi.org/10.1520/C1340-04>.

- Atzeri, A. M., F. Cappelletti, A. Tzempelikos, and A. Gasparella (2016). Comfort metrics for an integrated evaluation of buildings performance. *Energy and Buildings* 127 (Sep.). Elsevier B.V.: 411–424. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.007>.
- Batista, J. O. (2011). *Eficácia da ventilação mecânica noturna para resfriamento: impacto de estratégias híbridas de ventilação no desempenho térmico de residência em Florianópolis-SC*. Tese de Doutorado, Florianópolis: UFSC.
- Batista, J. O., R. Lamberts, and S. Güths (2011). Influências dos algoritmos de condução e convecção sobre os resultados de simulações do comportamento térmico de edificações. *Ambiente Construído* 4(11):79–97. <https://www.seer.ufrgs.br/index.php/ambienteconstruido/article/view/21650>.
- Beausoleil-Morrison, I. (2000). *The adaptive coupling of heat and air flow modeling within dynamic whole-building simulations*. Doctoral thesis, Glasgow, UK: University of Strathclyde.
- Beausoleil-Morrison, I. (2002). The adaptive simulation of convective heat transfer at internal building surfaces. *Building and Environment* 37(8):791-806. [http://doi.org/10.1016/S0360-1323\(02\)00042-2](http://doi.org/10.1016/S0360-1323(02)00042-2).
- Beausoleil-Morrison, I. (2021). *Fundamentals of building performance simulation*. 1st ed. (1). New York: Routledge.
- Clarke, J. A. (1991). *Internal convective heat transfer coefficients: a sensitivity study*. Glasgow, UK.
- DOE, U.S. Department of Energy (2017). *Weather Data*. <https://energyplus.net/weather>.
- EN (2019). EN 16798-1 *Energy performance of buildings — Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics - Module M1-6*. European Standard.
- Fanger, P. O. (1970). *Thermal comfort: Analysis and applications in environmental Engineerings*. Michigan: Mcgraw-hill.
- Fisher, D. E., and C. O. Pedersen. 1997. Convective heat transfer in building energy and thermal load calculations. *ASHRAE Transactions* 103(pt 2).
- Fohanno, S., and G. Polidori (2006). Modelling of natural convective heat transfer at an internal surface. *Energy and Buildings* 38(5). <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.09.003>.
- ISO (2003). *ISO 15099. Thermal performance of windows, doors, and shading devices - Detailed calculations*. International Organization for Standardization.
- ISO (2005). *ISO 7730 Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the pmv and ppd indices and local thermal comfort criteria*. International Organization for Standardization.
- ISO (2017). *ISO 17772-1 Energy performance of buildings - indoor environmental quality - Part 1: Indoor environmental input parameters for the design and assessment of energy performance of buildings*. International Organization for Standardization.
- Kottek, M., J. Grieser, C. Beck, B. Rudolf, and F. Rubel (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification Updated. *Meteorologische Zeitschrift*. <http://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>.
- Peeters, L., I. Beausoleil-Morrison, and A. Novoselac (2011). Internal convective heat transfer modeling: critical review and discussion of experimentally derived correlations. *Energy and Buildings* 43(9):2227–2239. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.05.002>.
- Pinto, M. M., and F. S. Westphal (2022a). Assessment of thermal comfort in workstations near highly-glazed façades: Solar-Adjust models. *Ambiente Construído*. <https://www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/view/120672>
- Pinto, M. M., and F. S. Westphal (2022b). Condições de contorno externo de paredes internas: simular uma zona térmica adiabática ou integrada ao pavimento? In *Anais do XIX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC)*, 1–15. Canela: ANTAC. <https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/issue/view/22>.
- U.S. Department of Energy (2022a). *EnergyPlus Documentation engineering reference*. DOE.
- U.S. Department of Energy (2022b). *EnergyPlus Documentation input output reference*. U.S.A.: DOE.
- Walton, G. N. 1983. *Thermal analysis research program reference manual*. NBSSIR83-2655. Washinton, DC.

## ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ORIENTAÇÃO SOLAR EM HABITAÇÕES DE INTERESSE SOCIAL PARA DIFERENTES CLIMAS DO BRASIL

Clara Zibetti Matuella Veiga<sup>1</sup>, Larissa Pereira de Souza<sup>1</sup>, Roberto Lamberts<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil

### Resumo

Este estudo apresenta uma análise da variação do desempenho térmico de uma habitação de interesse social considerando diferentes orientações solares e climas. Foi utilizado o método de simulação descrito na NBR 15575-2021, desenvolvido por meio do programa EnergyPlus. Foram avaliados os parâmetros de temperatura operativa máxima e mínima, percentual de horas dentro da faixa de temperatura operativa e cargas térmicas para três cidades brasileiras, variando a orientação de implantação das mesmas em intervalos de 45°. Os resultados demonstram que a orientação de melhor desempenho não é a mesma para todos os climas, e as orientações intermediárias nem sempre seguem o padrão das orientações mais próximas, e devem ser consideradas.

### Introdução

Após a crise energética de 2001, que afetou o fornecimento e a distribuição de energia elétrica em todo o país, o Brasil passou a voltar seus olhares de forma mais consciente para o consumo de energia. Nesse mesmo ano, foi sancionada a Lei Nº 10.295, que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, sendo o pontapé inicial para estudos relacionados à eficiência energética em edificações no país (LAMBERTS et al., 2016). A partir daí, foi dada uma maior importância a pesquisas com essa temática, culminando nas normativas ABNT NBR 15575 e ABNT NBR 15220, que tratam do desempenho de edificações, em especial do desempenho térmico das mesmas.

Edificações de alto desempenho não são exclusividade de edificações com alto valor agregado ou dotadas de alta tecnologia. Algumas soluções simples podem ser aplicadas de modo a elevar o nível de desempenho energético de habitações de interesse social, o que no Brasil vem a ser de extrema importância, já que mais de 90% da população possui renda inferior a R\$ 3.500 e cerca de 63 milhões de brasileiros possuem rendimento que não supera os 500 reais mensais (MOTA, 2021).

Em face ao cenário de vulnerabilidade financeira em que se encontra grande parte da população brasileira, aliado ao déficit habitacional de mais de 5,8 milhões de moradias (FJP, 2020), foi implementado pelo governo federal no ano de 2009 o Programa Minha Casa Minha Vida, que surge como uma forma de facilitar a aquisição da residência própria por famílias de baixa renda. Entretanto,

o programa conta com projetos residenciais genéricos, que não levam em consideração as particularidades de cada uma das zonas bioclimáticas definidas na NBR 15220, culminando em moradias com desempenho energético e conforto térmico reduzido (NETO, 2018), (THERY, 2017).

Dada a problemática, surge a necessidade de quantificar o desempenho térmico dessas residências, como mostra o estudo realizado por Triana (2016), onde foram levantadas as tipologias de habitações de interesse social (HIS) mais recorrentes no Brasil. Na pesquisa foram estudadas duas zonas bioclimáticas distintas, Zona 3 e Zona 8, alterando a orientação dessas tipologias em intervalos de 90°.

Em resposta às análises e considerações feitas por Triana (2016), observa-se a possibilidade de enriquecimento das mesmas por meio de uma análise mais abrangente, que considere mais variações de orientações, garantindo uma maior flexibilidade de implantação do projeto. Além disso, para garantir a abrangência de aplicação do projeto a nível nacional, mais climas devem ser avaliados, de modo a comprovar a necessidade de projetos que levem em consideração as particularidades de cada região do país, procurando elevar o desempenho térmico desse tipo de edificação, haja vista a importância e amplitude do Programa Minha Casa Minha Vida.

Ademais, este estudo se trata de uma análise preliminar de um mais complexo, onde serão avaliadas novas configurações e melhorias na envoltória da edificação, tendo como base os resultados aqui obtidos.

Tendo em vista o exposto, o objetivo desta pesquisa é aprofundar as análises propostas em estudo anterior, englobando uma quantidade maior de zonas bioclimáticas e variações na orientação da edificação, realizando as análises por meio do método de simulação computacional proposto pela NBR 15575-2021.

### Método

A fim de alcançar os objetivos da pesquisa, o método está dividido na apresentação do caso base, das variações de orientações, e por fim, dos climas avaliados.

### Caso base

Optou-se por adotar para o estudo um modelo residencial para a Faixa 1 do Programa Minha Casa Minha Vida. Essa faixa do programa se estende para famílias com renda mensal de até R\$ 1.800 (CAIXA ECONÔMICA FEDERAL, 2020) e foi escolhida por concentrar o maior

déficit habitacional do país. O modelo residencial proposto por Triana (2016) consiste em uma edificação de interesse social unifamiliar isolada, térrea, com área útil de cerca de 40m<sup>2</sup>, composta por dois quartos, um banheiro e uma sala conjugada com cozinha. Essa tipologia residencial foi adotada por ser a mais presente no país e a que apresenta os níveis mais baixos de desempenho térmico quando comparada a outras tipologias, como casas geminadas ou residências multifamiliares (TRIANA, 2016). A partir do apresentado, o projeto foi modelado no programa *SketchUp Make* (TRIMBLE, 2022) por meio do *plugin Euclid 0.9.4.4* (BIG LADDER SOFTWARE, 2022). A Figura 1 e Figura 2 apresentam o modelo proposto, em 3D e planta baixa, respectivamente.

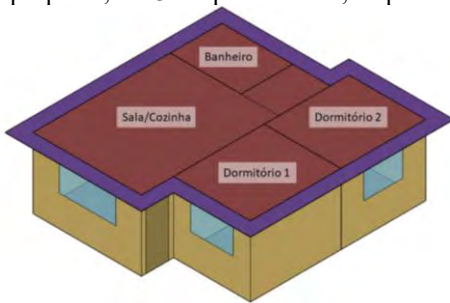


Figura 1: Modelo 3D da residência unifamiliar proposta



Figura 2: Planta baixa da residência unifamiliar proposta

Fonte: Triana (2016).

Para a análise, são considerados os ambientes de permanência prolongada (APPs): sala e cozinha conjugadas e os dois dormitórios, cada qual com o respectivo padrão de ocupação. A sala/cozinha é ocupada entre as 14h e as 22h, enquanto os dormitórios apresentam ocupação entre as 22h e 8h, conforme descrito pelo método de avaliação da NBR 15575-2021.

Já os componentes construtivos da envoltória são fixos de acordo com o modelo base proposto por Triana (2016). As propriedades térmicas dos elementos opacos da envoltória são apresentadas na Tabela 1. O vidro possui transmitância térmica de 5,7 W/(m<sup>2</sup>.K) e fator solar 0,82.

Tabela 1: Propriedades térmicas da envoltória

Elemento	Componente construtivo	U [W/m <sup>2</sup> .K]	Ct [kJ/m <sup>2</sup> .K]	α
Parede (interna + externa)	Bloco cerâmico + reboco interna e externa	2,43	132	0,5
Laje em contato com o solo	Concreto maciço	3,4	178,4	0,7
Cobertura	Telha de fibrocimento e forro em PVC	1,75	21,4	0,6

### Cidades avaliadas

Para a análise comparativa, foram avaliadas três cidades localizadas em diferentes zonas bioclimáticas brasileiras de acordo com a NBR 15220.

Primeiro, selecionou-se São Luís, no Maranhão, representando cidades de clima quente, localizada na Zona Bioclimática 8. Para representar cidades de clima frio, escolheu-se a cidade de Curitiba, no Paraná, na Zona Bioclimática 1. Por fim, uma cidade mais ao centro do país, caracterizando um clima mais ameno: Brasília, no Distrito Federal, localizada na Zona Bioclimática 4.

Para as simulações, foram utilizados arquivos climáticos do tipo Typical Meteorological Years (TMY) de 2007 a 2021 (CRAWLEY & LAWRIE, 2022).

A Figura 3 representa a variação anual da temperatura do ar de cada cidade, extraída do arquivo climático utilizado.

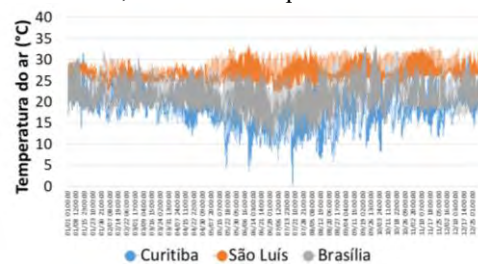


Figura 3: Variação anual de temperatura do ar das cidades

### Variações de orientação

A partir do caso base, considerado como azimute de 0° (Figura 2), realizou-se a variação da orientação da HIS em intervalos de 45°, resultando em azimutes de 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270° e 315°, que virão a proporcionar diferentes exposições das fachadas da edificação à radiação solar.

Em posse dos dados e do parâmetro escolhido a ser variado, foram realizadas as simulações computacionais com base na NBR 15575-2021: um modelo de ventilação natural e um modelo com condicionamento de ar para cada caso. Utilizou-se do EnergyPlus (na versão 22.1. Ao fim das simulações, foram extraídos resultados de acordo com a NBR 15575-2021: percentual de horas ocupadas dentro da temperatura operativa (PHFT), carga térmica de resfriamento e aquecimento (CgTR e CgTA) e temperaturas operativas máxima e mínima (To,máx e To,mín).

Logo, foram realizadas análises para a residência considerando as três zonas bioclimáticas escolhidas, oito orientações de implantação e duas situações de ventilação, totalizando 48 simulações.

### Resultados

Os resultados estão apresentados por cidade e, posteriormente, são avaliados em conjunto.

#### Curitiba - PR

Para Curitiba, os resultados de temperatura operativa mínima e máxima são apresentados na Figura 4.

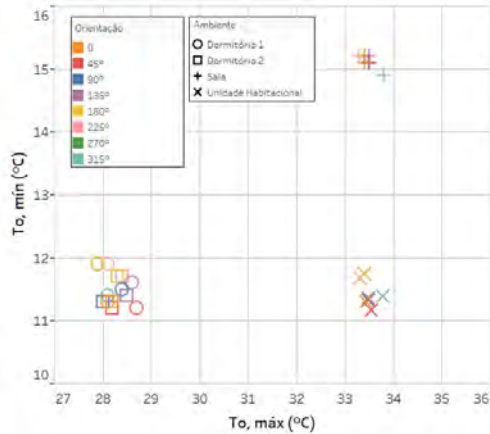


Figura 4: Temperaturas operativas máxima e mínima para Curitiba

Nota-se que as temperaturas operativas máximas e mínimas não apresentam diferenças superiores a 1°C pela alteração de orientação, em todos os ambientes, evidenciando a pouca interferência da orientação nesse parâmetro.

A Figura 5 apresenta os resultados de PHFT e carga térmica total.

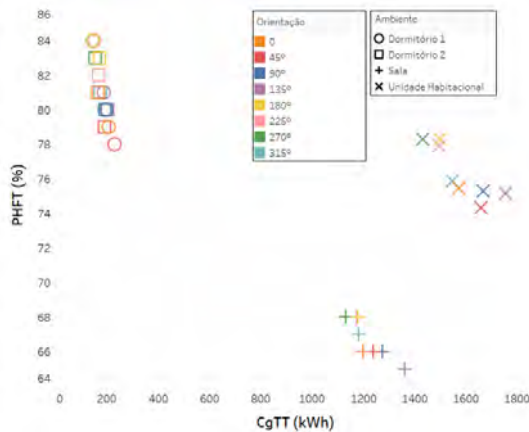


Figura 5: Resultados de PHFT e carga térmica total (CgTT) para Curitiba

Já os resultados de carga total e PHFT apresentam diferenças relevantes entre os casos avaliados. O PHFT é mais baixo na sala em relação aos dormitórios na maioria dos casos, um resultado esperado tendo em vista as diferenças de temperatura operativa avaliadas anteriormente pela Figura 4.

Observa-se uma diferença considerável no desempenho térmico entre as orientações, e também uma diferença entre as orientações mais satisfatórias para cada um dos ambientes, isto é, a orientação que fornece maior conforto para o dormitório 1 não necessariamente será aquela que acarreta um melhor desempenho para a sala ou o dormitório 2.

A 45°, ambos os dormitórios apresentam uma queda das temperaturas operativas mínimas, por receberem radiação solar durante a manhã, e ainda no período da tarde no caso do dormitório 2. Consequentemente, demandam carga de aquecimento à noite, elevando a CgTA e reduzindo o PHFT. Por outro lado, essa orientação proporciona à sala

uma grande exposição ao sol durante a tarde, elevando as temperaturas mínimas e, em consequência, o PHFT, que apresenta um desempenho intermediário em relação às demais orientações adotadas. Em análise ao comportamento da UH, verifica-se que, nesse caso, os dormitórios regem o desempenho da UH, que apresenta conforto reduzido em função da grande quantidade de horas com temperaturas baixas e necessidade de sistema de aquecimento.

Considerando o azimute de 135° (Figura 6), a alta carga térmica e baixo PHFT reflete a alta incidência solar na sala, em especial no período da tarde, onde as temperaturas são mais elevadas e o ambiente está ocupado. Esta orientação também reduz o recebimento de radiação solar no dormitório 2, que passa a ter uma de suas fachadas orientada a sul, diminuindo as temperaturas mínimas e aumentando a necessidade de carga térmica de aquecimento.

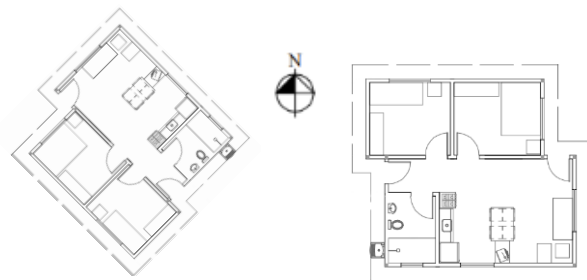


Figura 6: Implantações com orientações de 135° (à esquerda) e 270° (à direita)

Já a orientação a 270° (Figura 6) apresenta resultados de carga térmica total reduzidos em comparação às demais, uma vez que o sol incide apenas no início da manhã e no fim do dia na sala, reduzindo a carga térmica de resfriamento ao longo do dia. Ainda, os dormitórios recebem radiação durante todo o dia, diminuindo a necessidade de carga térmica de aquecimento à noite e elevando o PHFT, tendo em vista que os dormitórios só têm ocupação durante a noite, e a sala, durante o dia. Observa-se ainda que nenhum APP apresenta PHFT inferior a 65% e as cargas térmicas totais não ultrapassam 1800 kWh para nenhuma das orientações adotadas, o que traduz um bom desempenho térmico desta tipologia de edificação para a zona bioclimática em questão. Como exemplo, pode-se verificar uma redução de apenas 18% da CgTT e aumento de 3% do PHFT entre as orientações que apresentam o parâmetro CgTT mais elevado (135°) e mais reduzido (270°).



**Brasília - DF**

As simulações realizadas para a cidade de Brasília apresentaram resultados mais dispersos quando comparados à Curitiba, em especial em relação às temperaturas operativas, com temperaturas máximas nos dormitórios com variações de até 2°C, como mostra a Figura 7.

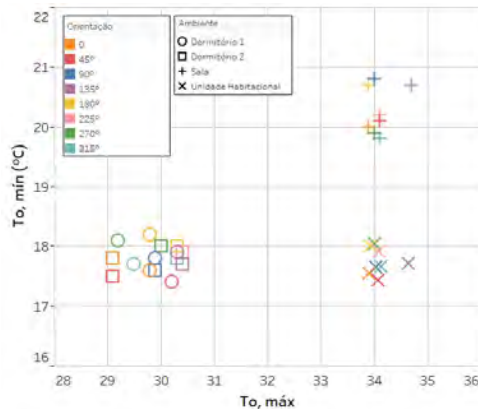


Figura 7: Resultados de temperaturas operativas máxima e mínima para a cidade de Brasília

Já a Figura 8 representa os resultados de PHFT e carga térmica total. São verificados que o PHFT atinge valores percentuais que oscilam entre 20% e mais de 90%, com picos superiores registrados nos dormitórios e inferiores, na sala, seguindo o que se espera. Para a UH em geral, o conforto analisado através apenas do PHFT é bom, visto que apresenta valores na faixa dos 70%, porém os valores da sala não superam os 30%.

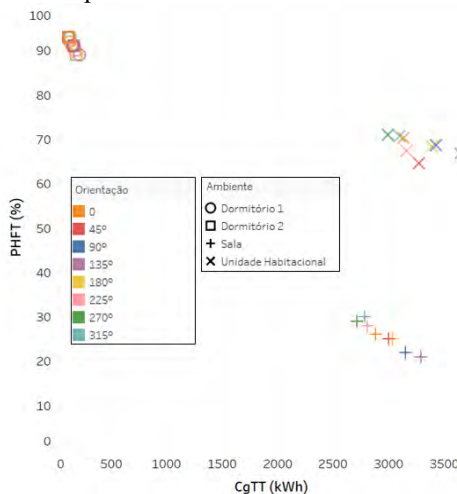


Figura 8: Resultados de PHFT e carga térmica total (CgTT) para a cidade de Brasília

Segundo estudo, a cidade de Brasília apresenta conforto térmico na maior parte do ano e os períodos de desconforto em geral são devidos ao frio (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2016). No entanto, na análise feita, observa-se que a carga térmica total da edificação se equipara à carga térmica de resfriamento, devido aos valores desprezíveis encontrados para as cargas de aquecimento.

A carga térmica se mostra bastante variável em função da orientação adotada, principalmente na sala. À medida que aumenta a CgTT em um APP, aumenta também a CgTT dos outros ambientes. Por outro lado, a relação percentual entre os APPs não apresenta tal comportamento.

Apesar da orientação a 135° apresentar valores altos de CgTT e To, máx para a UH quando comparada às demais orientações, o PHFT da edificação nessa orientação não demonstra ser o menor. Para a UH, quando comparados os resultados a 135°, que possui valores máximos de CgTT, e a 270°, com os valores mais reduzidos, observa-se uma redução de CgTT de cerca de 18%. Em relação ao PHFT, comparando os valores máximos (270°) e mínimos (45°), verifica-se uma variação de 6%.

Mais uma vez, a sala, em todos os casos de orientação considerados, apresentou os resultados menos satisfatórios em função da carga térmica, PHFT e temperatura operativa máxima. Em contrapartida, ambos os dormitórios, da maneira como foram projetados, apresentam comportamento bastante satisfatório para todas as orientações, com carga térmica próxima de zero e PHFT bastante elevado, por vezes superando os 90%.

**São Luís - MA**

A cidade de São Luís, por estar inserida em um clima quente durante o ano todo, apresenta temperaturas mínimas e máximas mais elevadas quando comparadas às demais cidades analisadas, com taxas de conforto térmico muito reduzidas. Em geral, as temperaturas operativas não apresentam muitas alterações para cada APP avaliada individualmente, com variações inferiores a 1°C. A Figura 9 demonstra os resultados de temperatura operativa.

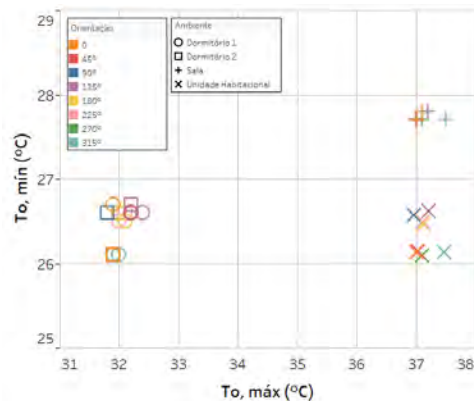


Figura 9: Temperaturas operativas máxima e mínima de São Luís

As variações de orientação da edificação resultam em alterações consideráveis em especial nos dormitórios e na UH como um todo, sem exercer muita influência nas temperaturas da sala, que permanecem em constância elevada independentemente da orientação adotada. Para cidades localizadas na Zona Bioclimática 8, como é o caso, quanto menores forem as temperaturas operativas mínima e máxima, mais confortável é a habitação. Nas condições propostas, os azimutes de 45° e 90° (nordeste e leste, respectivamente) apresentaram um comportamento mais próximo do descrito.

A respeito do PHFT, exibido na Figura 10, o percentual de horas ocupadas dentro da temperatura operativa, em geral, não supera os 18% em nenhum APP, com exceção de dois casos no dormitório 2, resultando em uma UH com PHFT médio próximo dos 9%.

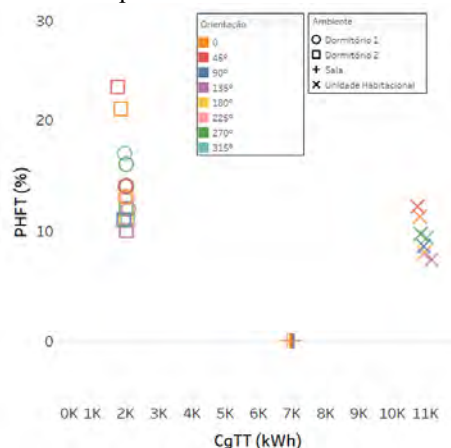


Figura 10: PHFT e carga térmica total (CgTT) em São Luís

Para todas as orientações consideradas, a sala apresentou PHFT nulo, exigindo sistema de condicionamento de ar durante todas as horas de ocupação do ambiente. Além disso, podem ser observados dois picos de PHFT: as orientações a 0° e 45° para o dormitório 2. Estas orientações trazem uma incidência solar no período da manhã, enquanto à tarde, quando as temperaturas se elevam, o dormitório está orientado para o lado oposto onde incide a radiação. Isto faz com que as temperaturas operativas máxima e mínima sejam reduzidas, de forma a exigir menor carga térmica de resfriamento, elevando o PHFT. Este mesmo comportamento é observado no dormitório 1 para os azimutes de 270° e 315°, porém com menor intensidade, o que pode ser explicado pela posição das aberturas.

O azimute de 135° é o que apresenta, em geral, o desempenho térmico mais reduzido, com incidência de radiação solar muito intensa durante todo o dia na sala. Outras orientações, como a 315°, por exemplo, apresenta temperatura operativa máxima mais elevada se comparada à 135°, porém a mínima é mais reduzida, fazendo com que haja um balanceamento que culmina em um PHFT mais elevado e CgTT reduzida.

Quando comparados os valores de CgTT máximos (135°) e mínimos (45°) para a UH é verificada uma variação próxima de 4%, bastante reduzida. Já para o PHFT pode ser observada uma variação de cerca de 5% entre as orientações citadas. Vale ressaltar que o valor absoluto de carga térmica em São Luís é 6 vezes maior que em Curitiba.

Arelado a esses resultados, é evidenciado através da Figura 10 a grande necessidade da utilização de condicionamento de ar em todos os ambientes, com carga térmica total da UH de mais de 11000 kWh na orientação 135°, que mais carece de estratégias de resfriamento. A sala, por ter apresentado um PHFT igual a zero para todas as orientações propostas, é o ambiente que apresenta a maior demanda por sistema de condicionamento de ar,

com carga térmica constante de cerca de 7000 kWh para todas as orientações. Logo, no caso da sala, a orientação não é um determinante de desempenho, visto que sua ocupação é durante o dia, e o maior ganho de calor advém da cobertura neste período, por radiação.

### Comparação entre cidades

Considerando uma verificação mais específica, para todas as cidades e orientações consideradas, o ambiente sala mostra-se com desempenho térmico inferior, enquanto os dormitórios 1 e 2 alternam entre si o melhor índice de conforto, a depender da orientação e cidade. Isso acontece principalmente pois o padrão de ocupação da sala ocorre no período compreendido entre as 14h e 22h, quando as temperaturas externas são mais elevadas, enquanto nos dormitórios a ocupação se dá no período noturno, entre as 22h e 8h, com temperaturas mais baixas. Logo, percebe-se que para a UH, tem-se a temperatura máxima advinda da sala, e a mínima respectiva aos dormitórios.

Após as análises individuais, verifica-se que, para todas as cidades consideradas no estudo é observado que o desempenho da edificação segue um comportamento semelhante para todos os APP, culminando no comportamento da UH como um todo, que se apresenta como uma “média” dos ambientes de permanência prolongada. Ainda, verifica-se que as orientações intermediárias (45°, 135°, 225° e 315°) não seguem necessariamente a lógica de apresentarem resultados médios em relação às orientações principais (0°, 90°, 180° e 270°).

As orientações mais e menos satisfatórias para cada ambiente, e conseqüentemente para a UH, variaram muito de cidade para cidade. Por exemplo, enquanto para Curitiba e Brasília a orientação a 45° apresenta desempenho térmico bastante reduzido, em São Luís a implantação da edificação seguindo essa orientação apresenta desempenho térmico superior em comparação às demais.

Para Curitiba e São Luís, o dormitório 1 apresenta o melhor desempenho entre os APP, enquanto para Brasília este ambiente é o dormitório 2. Além disso, a diferença entre o desempenho dos dormitórios cresce em função do aumento da temperatura das cidades, isto é, para Curitiba a variação do desempenho entre os dormitórios é bastante reduzida, em Brasília essa variação aumenta e em São Luís há a maior amplitude entre os valores de PHFT, CgTT e  $T_o$  para os dormitórios.

Complementarmente, pelo fato do clima de São Luís não apresentar uma amplitude térmica anual elevada, a orientação solar exerce influência reduzida no desempenho térmico da mesma, quando comparada às outras cidades. Por exemplo, a alteração de orientações não é muito relevante na sala, tendo em vista os resultados de PHFT iguais a 0% e cargas térmicas totais muito próximas. Isso porque a sala recebe ocupação durante o dia, juntamente com o período de maior radiação que, nesse caso, é mais intenso na cobertura.

Em Brasília, por exemplo, se rotacionarmos a edificação em 45° do azimute 225° para 180° há uma redução de cerca de 300 kWh de carga térmica de aquecimento na

edificação, elevando em cerca de 2% o PHFT. No entanto, para a cidade de São Luís, a mesma estratégia apresenta resultado muito inferior, evidenciando que, neste caso, seria necessário propor outro tipo de melhoria, que não relacionada somente à alteração de orientações solares, mas sim, relacionadas a elementos construtivos da envoltória (como a ampliação das aberturas e sombreamento das mesmas, promovendo ventilação natural mais intensa no interior da edificação (BAGNATI, 2013)).

## Conclusões

O objetivo desta pesquisa foi aprofundar as análises de orientação solar e uma edificação residencial unifamiliar relacionadas a diferentes climas. As análises foram realizadas por meio do método de simulação computacional proposto pela NBR 15575-2021.

Os resultados de parâmetros de desempenho relacionados à orientação se mostraram distintos por clima e por ambiente. Além disso, a rotação intermediária dos ângulos não necessariamente segue um padrão médio. Ou seja, a rotação da residência em 45° não necessariamente será o valor médio entre resultados de 0° e 90°. Além disso, analisando ambientes separadamente, a variação de orientação é efetiva na maioria dos casos, mas em climas mais quentes, como São Luís, pode não apresentar grande impacto.

Cada cidade brasileira, por estar inserida em uma zona que apresenta particularidades, demanda estratégias bioclimáticas distintas para que se atinja melhor desempenho energético. É evidente que, mesmo que apresentem orientações desfavoráveis semelhantes, cada edificação deve ser analisada isoladamente e algumas soluções que funcionam para um dado clima, não surtem efeito em outro. A mudança da orientação da edificação, uma estratégia simples, pode elevar o desempenho consideravelmente, porém o ideal é adotar a orientação da edificação correta e estratégias adequadas durante a concepção do projeto arquitetônico.

Por fim, comprova-se a necessidade da revisão dos projetos do programa Minha Casa Minha Vida, com adoção de estratégias e soluções bioclimáticas que façam sentido para cada clima e cidade em questão.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à Eletrobrás/PROCEL pelos recursos financeiros aplicados no desenvolvimento desta pesquisa.

## Referências

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15575: Edificações habitacionais - Desempenho. *Rio de Janeiro, 2021.*
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15220: Desempenho térmico de edificações. *Rio de Janeiro, 2005.*
- Bagnati, M. Zoneamento Bioclimático e Arquitetura Brasileira: Qualidade do Ambiente Construído. *Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.* 133 p.

Barbosa, K. Avaliação da influência da orientação solar, associada ao comportamento do usuário, no desempenho térmico de uma tipologia de residência unifamiliar em Goiânia. *Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.* 255 p.

Big Ladder Software. Euclid. Disponível em: <https://bigladdersoftware.com/projects/euclid>. Acesso em 04 de agosto de 2022.

Caixa Econômica Federal (CEF). Financiamento Habitacional - Minha Casa Minha Vida. *Brasília, 2020.* Disponível em: <https://www.caixa.gov.br/voce/habitacao/minha-casa-minha-vida/urbana/Paginas/default.aspx>. Acesso em 29 de novembro de 2022.

Crawley, D; Lawrie, L. Climate. *onebuilding.org.* Disponível em: <http://climate.onebuilding.org>. Acesso em novembro de 2022.

Fundação João Pinheiro. Déficit habitacional no Brasil - 2016-2019. *Belo Horizonte, 2021.* Disponível em: <http://fjp.mg.gov.br/deficit-habitacional-no-brasil/>. Acesso em 15 de novembro de 2022.

Lamberts *et al.* Desempenho Térmico de Edificações. *Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina: 2016.*

Lamberts, R.; Dutra, L.; Pereira, F.. Eficiência Energética na Arquitetura. *Rio de Janeiro: ELETROBRAS/PROCEL: 2014.*

Mota, C.V. Calculadora de renda: 90% dos brasileiros ganham menos de R\$ 3.500. *BBC News Brasil, 2021.* Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/brasil-57909632>. Acesso em 15/11/2022.

Neto, A.B. Análise da Eficiência Energética de uma Edificação Residencial através da Nova Proposta Brasileira de Etiquetagem de Edificações. *Universidade Federal de Santa Catarina, 2018.*

Thery, H. Novas Paisagens Urbanas do Programa Minha Casa, Minha Vida. *Universidade Federal do Ceará, 2017.*

Triana, M.A. Abordagem integrada no ciclo de vida de habitação de interesse social considerando mudanças climáticas. *Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.* 473 p.

Trimble. SketchUp Make. Disponível em: <https://www.sketchup.com/>. Acesso em 04 de agosto de 2022.

## CFD-based wind pressure coefficients on building facades with Butterfly/OpenFOAM for airflow network models

Nayara R. M. Sakiyama<sup>1</sup>, Joyce C. Carlo<sup>2</sup>, Jurgen Frick<sup>3</sup>, Harald Garrecht<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute for Science, Engineering and Technology (ICET), Federal University of the Jeq. And Muc. Valleys (UFVJM), Teófilo Otoni, Brazil

<sup>2</sup>Architecture and Urbanism Department (DAU), Federal University of Vicosa (UFV), Viçosa, Brazil

<sup>3</sup>Materials Testing Institute (MPA), University of Stuttgart, Stuttgart, Germany

### Abstract

Wind pressure coefficients ( $C_p$ ) represent a critical boundary condition when assessing multizone naturally ventilated buildings with airflow network (AFN) models. This simulation workflow uses OpenFOAM through a 3D parametric modeling platform. The approach is used to calculate surface-averaged  $C_p$ 's over an entire façade and an opening. The outcomes of these two efforts are compared to those auto-calculated by the building energy simulation (BES) AFN model. Finally, their impact on ventilation rates is verified. The results show a significant difference between the calculated  $C_p$  values, as well as on the airflow outputs, independent of the adopted approach.

### Introduction

Accurate prediction of airflow is essential when designing naturally ventilated buildings. Chen (2009) reviews the methods to predict natural ventilation, discussing analytical, empirical, small-/full-scale experimental models, zonal, multizone, and Computational Fluid Dynamic (CFD) models. CFD techniques are considered a robust tool to predict natural ventilation. However, their use is impractical for annual simulations due to computational complexity and cost. On the other hand, building energy simulation (BES) and Airflow network (AFN) modeling software are considered more appropriate for providing the ventilation rate for multizone buildings (Zhai et al., 2015). To calculate the wind-driven airflow through the building's zones, the building energy simulation software uses wind pressure coefficients ( $C_p$ ) estimated by secondary sources, namely analytical models or databases.

Cóstola et al. (2009) analyzed the use of  $C_p$  in BES and AFN models, identifying the coefficient as an uncertainty source, which is influenced by wind speed and direction, building geometry, façade exposure, and opening position on the surface. Under this perspective, Charisi et al. (2019), and Zubialde-Elzaurdia, et al. (2019) have run CFD simulations to calculate  $C_p$  values and assess its impact on AFN outputs, such as air changes per hour (ACH). In addition to these objectives, Dogan and Kastner (2021) propose a streamlined framework to facilitate the  $C_p$  calculation on building facades. The findings from these studies conclude that for tropical climates, sheltered or urban areas, and more complex

buildings shapes is justifiable to use wind pressure coefficients derived from CFD simulations.

This paper aims to investigate the impact of CFD-based  $C_p$  values on the ACH outputs from an AFN EnergyPlus (E+) multizone model. Like Dogan and Kastner (2021), this work also supports a simplified modeling approach to run CFD simulations to encourage its application when assessing buildings with natural ventilation.

On the other hand, the new aspect investigated within this paper seeks to compare the differences in ACH output, when the *Surface Average Calculation* method (Swami and Chandra, 1988), or auto calculated  $C_p$  values are disabled in the E+AFN model. In this case, the model's *Height Selection for Local Wind Pressure Calculation* properties can be set as either *ExternalNode*, or *OpeningHeight*. For the former, the CFD-based wind pressure coefficients are averaged over the whole façade (CFD 1), while for the latter, over every opening (CFD 2), thus providing inputs for both approaches.

Lastly, the differences between the  $C_p$  values from both CFD models are evaluated, and their impact on ventilation rates was compared with those outputted using the  $C_p$  values estimated by the *Surface Average Calculation* method.

### Simulation

#### Reference building – Case Study

The reference building concerns a full-scale passive test house from the INCAS experimental platform at the French National Institute for Solar Energy—INES facility, located near Chambéry, France (45°38'038.5" N 5°52'027.4" E). Also known as I-MA house (Figure 1), the edifice is a two-story rectangular cavity brick construction, with the most massive openings facing south (34% glazed). Together with a one-week monitoring period (19-25.08.14), the building was chosen as a base model because it is a facility built for energy use and comfort analysis at the whole building level. Therefore, it is equipped with various sensors and has a simple design to ensure a straightforward simulation verification process.

More aspects of the building construction, the experimental protocol, measurement equipment, and climatic data are presented in Sakiyama et al. (2021a). A complete description of the E+ AFN model, with 8

thermal zones, and the calibration method using the measuring campaign is also provided in that reference.

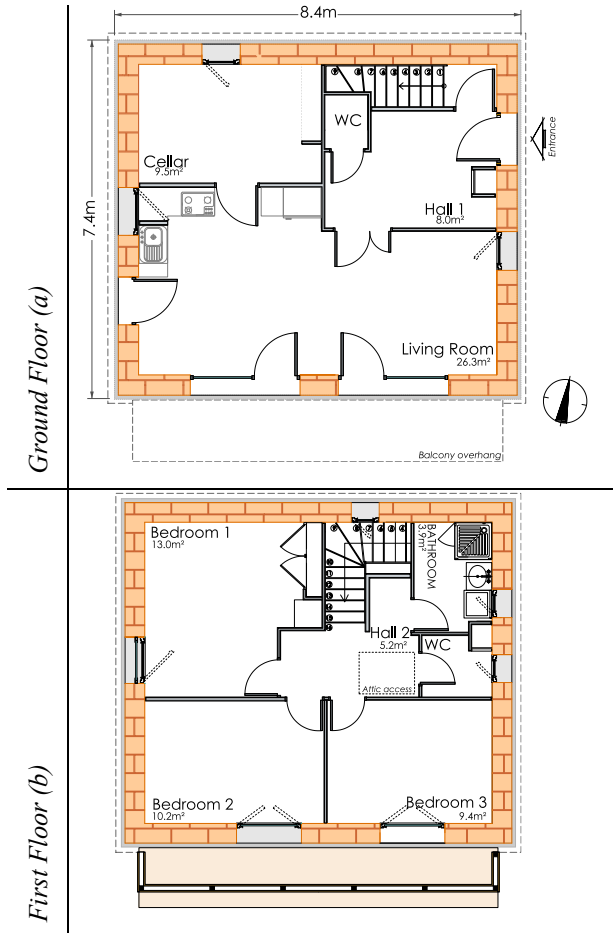


Figure 1 – IMA's floor plan

### CFD Model

Wind pressure coefficients for the AFN model of the I-MA building are computed through the CFD open-source code Field Operation and Manipulation OpenFOAM® software, version 2006. Rhino v5 (Robert McNeel & Associates, 2020) was used for the geometric model because Grasshopper (Davison, 2020) is settled for parametrization. Butterfly, a set of components from the LadyBug Tool (Roudsari and Mackey, 2022), is used as an object-oriented python library that creates and runs CFD simulations using OpenFOAM®. This approach combines visual programming interface (VPI) and 3D modeling platform utilities with CFD objective functions, facilitating post-processing and promoting CFD applications at the design phase.

A steady-state RANS model was employed, solved in combination with the standard k-ε turbulence model. Zhang et al. (2007), Cheung and Liu. (2011) and Farea et al. (2015) point this two-equation k-ε turbulence model as optimal from a performance and cost-effectiveness perspective when compared to other models. They have investigated different CFD turbulence models to predict airflow in naturally ventilated buildings. For velocity-pressure coupling, the SIMPLE algorithm was used.

The  $C_p$  values were averaged over the whole façade (CFD 1) and the windows (CFD 2), and these surfaces were modeled as patches (Figure 2).

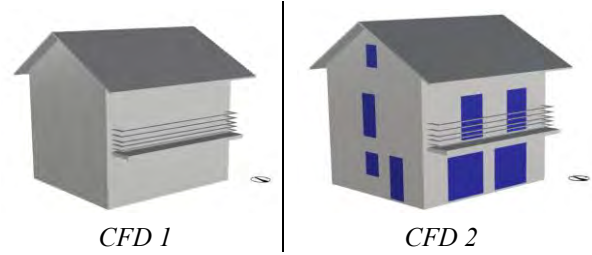


Figure 2: CFD models' geometries.

A detailed explanation of the computational domain, solver settings, mesh configuration, and the procedure implemented to establish the CFD boundary conditions, such as wind directions and velocities employed at the simulations, are provided in Sakiyama et al., (2021b), which differ in geometry, modeled with the windows opened.

### Calculation of surface-average $C_p$

At CFD 1, where the windows and walls form a closed surface, the external building patches form a plane where the corresponding  $C_p$  values can be calculated for the façades individually. In the case of CFD 2, each window was modeled as a single patch, so a  $C_p$  value was computed separately for each of the external openings.

The spatial wind-induced pressure variations on the façades and windows of the reference building were calculated for ten wind directions ( $\theta$ ): 0°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, 180°, 210°, 240°, 270°, with the respective wind velocities (m/s): 4.7, 2.6, 2.2, 1.8, 1.55, 1.64, 1.78, 1.55, 1.3, 1.72, set according to the criteria explained in Sakiyama et al., (2021). The  $C_p$  values were calculated according to Equation 1, where  $p$  is the pressure at the point of interest (Pa),  $p_{inf}$  is the pressure in the freestream (Pa),  $\rho$  is the freestream density ( $\text{kg/m}^3$ ), and  $U_{inf}$  is the freestream air velocity (m/s).

$$C_p = \frac{(p - p_{inf})}{0.5\rho U_{inf}^2} \quad (1)$$

As each façade and window was modeled as a patch surface, a pressure function object ran for one more interaction after the simulation had converged. Using a *patchAverage* post-processing function, an average  $C_p$  value in each façade orientation and window was determined.

### EnergyPlus Airflow network model: ACH calculation

The CFD-based  $C_p$  values averaged over the entire façade plane (CFD 1) and each window (CFD 2) were passed on to the IMA-house E+ AFN model to evaluate the differences in the calculated air changes per hour (ACH). CFD 1 provides inputs to the *ExternalNode* field and CFD 2 to the *OpeningHeight* field in the *Heigh Selection for Local Wind Pressure Calculation* at the E+ AFN model. The ACH metric was outputted for the Living room (LV)

and Cellar on the ground floor and the three bedrooms (BR1, BR2, BR3) on the first floor (Figure 1). Finally, normalized root mean squared error (nRMSE) values for the ACH results using the  $C_p$  from the CFD models were compared against those calculated using the E+ AFN internal  $C_p$  calculation method, the analytical model proposed by Swami and Chandra (1987).

### Results and discussion

Figure 3 and Figure 4 present the  $C_p$  variations and mean values calculated on the north and south façades (CFD 1) of I-MA house for the wind directions  $\theta=180^\circ$  and  $\theta=60^\circ$ , respectively.

Wind pressure coefficients on windward are either positive, close to zero, or have the smallest values predicted over the façades. Differences in the  $C_p$  contours depending on the incident wind are visibly observed in Figure 3 and Figure 4. Moreover, the impact of the balcony on  $C_p$  distribution is also perceptible (south façade), especially for the oblique wind and at the lower half of the façade, an effect that is also discussed by Montazeri and Blocken (2013).

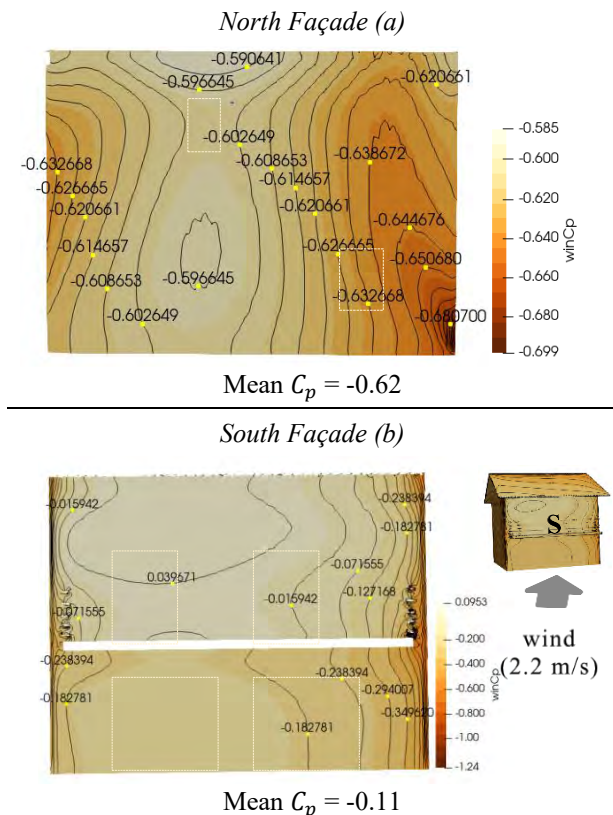


Figure 3 -  $C_p$  distribution calculated with OpenFOAM on two exposed I-MA building façades for south wind direction ( $\theta=180^\circ$ )

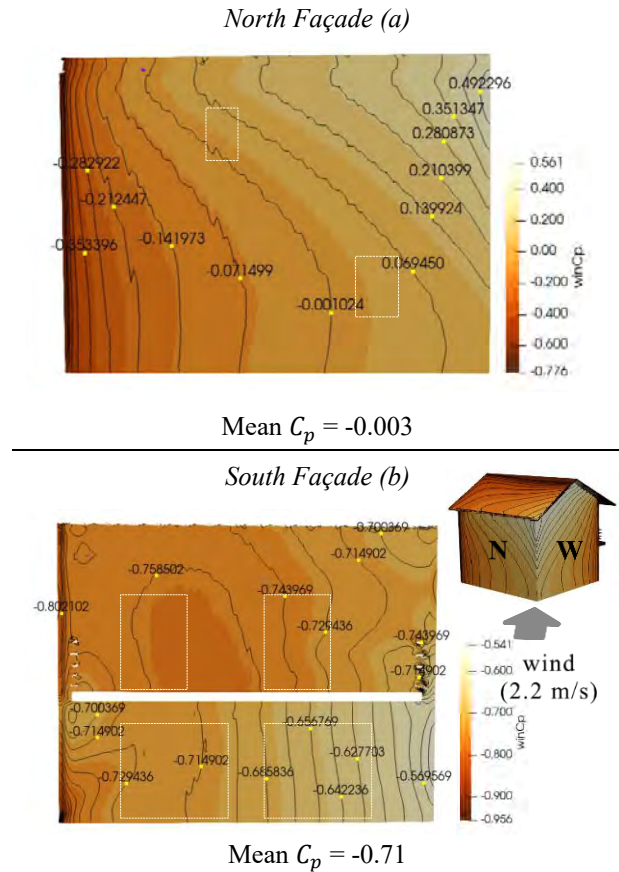


Figure 4 -  $C_p$  distribution calculated with OpenFOAM on two exposed I-MA building façades for east-north-east wind direction ( $\theta=60^\circ$ )

Window positions are also highlighted in Figure 3 and Figure 4 (light dashed lines) to demonstrate that the calculated  $C_p$  value for the façade might not necessarily characterize a specific opening, which varies according to the position and incident wind direction. In that sense, the relative error  $r$  for the  $C_p$  values averaged over window areas ( $C_{p-window}$ ) and the whole façade ( $C_{p-façade}$ ) is defined as:

$$r = \frac{(C_{p-window} - C_{p-façade})}{C_{p-façade}} \quad (2)$$

Figure 5 shows these calculated errors in each of the openings for all wind directions, grouped by façade. The values are close to zero or have minor errors when the wind blows perpendicular to the façade. These incidence angles are highlighted on the horizontal axis of the graphs shown in Figure 5. In general, windows in the same orientation present similar behavior. Those closest to the roof, a place of higher turbulence, have the most significant divergences: W15 (west façade - Figure 5d) and W13 (east façade - Figure 5a). However, an exception is window W13, located in the north façade, for wind direction  $\theta=60^\circ$  (Figure 5a and Figure 4 a). In this case, the window is situated where the  $C_p$  distribution is especially heterogeneous when compared to the entire façade, the error is uniquely high.

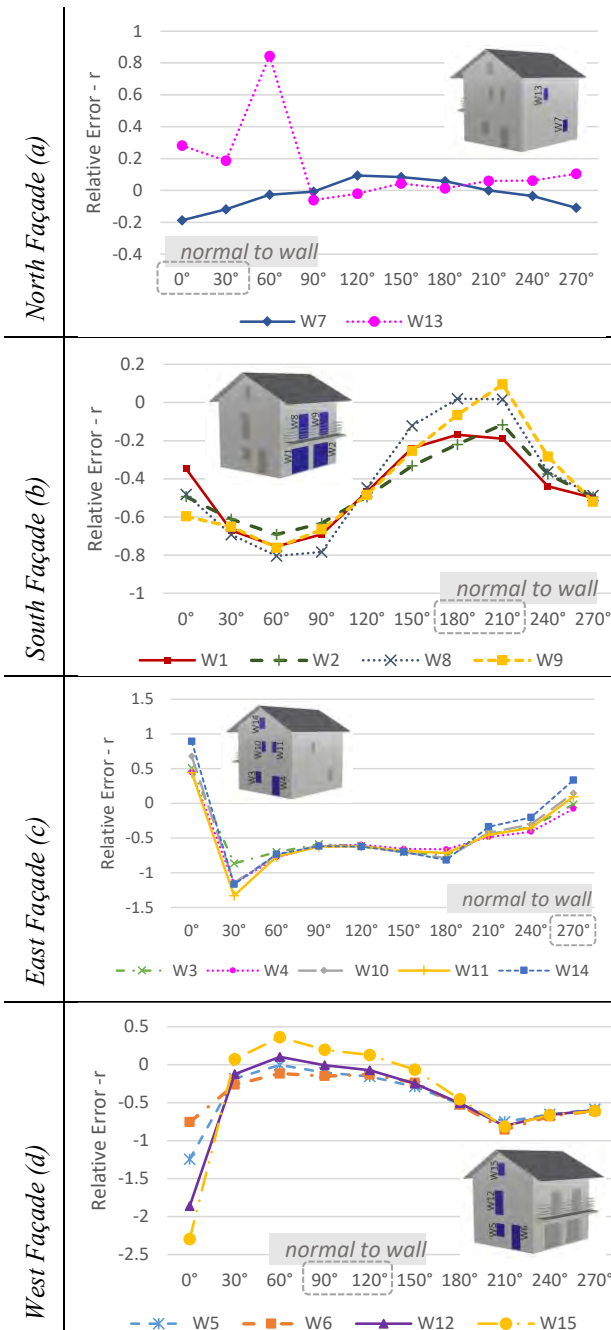


Figure 5 - Relative error  $r$  for  $C_p$  values averaged over window areas and the whole facade for all wind directions

**$C_p$  impact over predicted ACH**

Table 1: Comparison between the CFD-based  $C_p$  values and from the E+AFN analytical model - nRMSE

CFD-based $C_p$	North Façade	East Façade	South Façade	West Façade
<b>Façade (CFD 1)</b>	208.1%	58.7%	52.9%	69.1%
<b>Window (CFD 2)</b>	220.2%	66.2%	53.1%	62.9%

Table 2 summarizes the nRMSE from the  $C_p$  values for each facade, while Table 2 presents the nRMSE for the ACH data from the simulations using the CFD-based  $C_p$  values (CFD 1 and CFD 2), when compared to those auto-calculated in E+ AFN. The results are grouped in zones according to their orientation.

Table 1: Comparison between the CFD-based  $C_p$  values and from the E+AFN analytical model - nRMSE

CFD-based $C_p$	North Façade	East Façade	South Façade	West Façade
<b>Façade (CFD 1)</b>	208.1%	58.7%	52.9%	69.1%
<b>Window (CFD 2)</b>	220.2%	66.2%	53.1%	62.9%

Table 2: nRMSE of the ACH resulting from the CFD-based and auto-calculated E+AFN  $C_p$  values

	North Façade	South Façade			West Façade
	Cellar	LV	BR2	BR3	BR1
<b>Façade (CFD 1)</b>	18.6%	7.2%	7.5%	10.1%	11.5%
<b>Window (CFD 2)</b>	14.9%	4.5%	7.9%	10.2%	11.5%

**Conclusion**

The differences between  $C_p$  values averaged over windows (CFD 2) and  $C_p$  values averaged over the facades (CFD 1) are smaller when wind meets the facade perpendicularly and more significant for parallel flows. Moreover, the biggest divergencies appear in the openings near the roof.

In addition, the different *Heigh Selection for Local Wind Pressure Calculation* at the E+ AFN model using the two CFD-based  $C_p$  values showed a direct impact on airflow predictions. Both results showed a considered difference from those estimated with the *Surface Average Calculation* method.

Although coupling CFD with BES configures a complex task with a high computational cost, the approach used in this investigation can encourage comprehensive building evaluations through the combination of more accessible airflow simulation resources.

**Acknowledgement**

The authors would like to acknowledge the financial support by the Minas Gerais State Agency for Research and Development (FAPEMIG), which funded part of this research. Moreover, the study was possible thanks to the contributions of the French National Institute for Solar Energy (INES, France), the Federal University of the Jequitinhonha and Mucuri Valleys (UFVJM, Brazil), and the Materials Testing Institute University of Stuttgart (MPA, Germany), which collectively supported this work.

## References

- Charisi, S., Waszczuk, M., Thiis, T.K. (2019) Determining building-specific wind pressure coefficients to account for the microclimate in the calculation of air infiltration in buildings, *Advances in Building Energy Research 111*, 1–22. <https://doi.org/10.1080/17512549.2019.1596835>.
- Chen, Q. (2009) Ventilation performance prediction for buildings: A method overview and recent applications, *Building and Environment 44*, 848–858. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.05.025>
- Cheung, J.O.P.; Liu, C.-H. (2011), CFD simulations of natural ventilation behaviour in high-rise buildings in regular and staggered arrangements at various spacings. *Energy Build.*, 43, 1149–1158.
- Cóstola, D., Blocken, B., Hensen, J.L.M. (2009), Overview of pressure coefficient data in building energy simulation and airflow network programs, *Building and Environment 44*, 2027–2036. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.02.006>
- Davison, S. (2020), *Grasshopper*-Algorithmic Modeling for Rhino [Computer program]. Available at <http://www.grasshopper3d.com> (Accessed 23 November 2020).
- Dogan, T., Kastner, P. (2021), Streamlined CFD simulation framework to generate wind-pressure coefficients on building facades for airflow network simulations. *Building Simulation 14*, 1189–1200. <https://doi.org/10.1007/s12273-020-0727-x>
- Farea, T.G.; Ossen, D.R.; Alkaff, S.; Kotani, H. (2015), CFD modeling for natural ventilation in a lightwell connected to outdoor through horizontal voids. *Energy Build.*, 86, 502–513.
- Montazeri, H., Blocken, B. (2013). CFD simulation of wind-induced pressure coefficients on buildings with and without balconies: Validation and sensitivity analysis, *Building and Environment 60*, 137–149. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.11.012>
- Robert McNeel & Associates. (2020), Seattle, WA, Rhinoceros (Version 5). Available at <https://www.rhino3d.com/> (Accessed 27 February, 2021)
- Roudsari, M. S., Mackey, C. Butterfly [Computer program]. Available at <https://www.ladybug.tools/butterfly.html>. (Accessed 23 November 2020)
- Sakiyama, R. M. N., Mazzaferro, L.; Carlo, J.C., Bejat, T.; Garrecht, H. (2021a). Natural ventilation potential from weather analyses and Building Simulation. *Energy & Buildings 231*, 110596. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110596>
- Sakiyama, R. M. N., Frick, J., Bejat, T.; Garrecht, H. (2021b). Using CFD to Evaluate Natural Ventilation through a 3D Parametric Modeling Approach, *Energies 14*, 2197. <https://doi.org/10.3390/en14082197>
- Swami, M., & Chandra, S. (1988). Correlations for pressure distribution on buildings and calculation of natural-ventilation airflow. *ASHRAE Transactions, 94 (3112)*, 243–266.
- Swami, M. V., Chandra, S. (1987) Procedures for calculating natural ventilation Airflow rates in buildings, *ASHRAE Research Project 448-RP*.
- Zhai, Z., Mankibi, M.E., Zoubir, A. (2015) Review of Natural Ventilation Models, *Energy Procedia 78*, 2700–2705. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.355>
- Zhang, Z.; Zhang, W.; Zhai, Z.J.; Chen, Q.Y. (2007). Evaluation of Various Turbulence Models in Predicting Airflow and Turbulence in Enclosed Environments by CFD: Part 2—Comparison with Experimental Data from Literature. *HVAC&R Res., 13*, 871–886
- Zubialde-Elzaurdia, M., Lucas, F., Bastide, A. (2019) Using CFD simulation to improve estimation of wind pressure coefficient for naturally-ventilated buildings in tropical climate. In: *40th AIVC conference*, Oct 2019, Ghent, Belgium.



## Análise de desempenho térmico: Comparação entre as versões de 2013 e 2021 da NBR 15.575-1

Caroline Viana de Souza<sup>1</sup>, Caroline Casarin Lohnhoff<sup>1</sup>, Larissa Azevedo Luiz<sup>2</sup>, Cristiane Rossatto Cândido<sup>1</sup>, Raquel Sanches<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ca2 Consultores Ambientais Associados, São Paulo, Brasil

<sup>2</sup>Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil

### Resumo

A NBR 15.575-1 define parâmetros de desempenho térmico para edificações habitacionais e, diante das deficiências na aplicação dos seus métodos desde sua normatização em 2013, passou por uma revisão em 2021, quando uma nova metodologia de simulação entrou em vigência. O objetivo deste artigo é comparar os procedimentos de 2013 e 2021 a partir de simulações computacionais para uma edificação residencial vertical “padrão” na RMSP. Os resultados demonstram divergências quanto ao atendimento à norma entre as metodologias e indicam que a revisão trouxe maior complexidade na simulação enquanto se aproxima das condições reais de uso do edifício.

### Introdução

Inserida em um contexto de melhoria da qualidade das habitações no Brasil e de caráter obrigatório, a NBR 15.575 estabelece padrões e requisitos de desempenho que transitam entre os mais diversos tópicos, tendo como pilares os parâmetros que dizem respeito à segurança, ao conforto e à resistência. Dentre os critérios estabelecidos para a questão de habitabilidade está o fator “desempenho térmico” que avalia as condições térmicas da unidade habitacional e garante que estas estejam apropriadas para as atividades realizadas no ambiente analisado (KRELLING et. al, 2020).

Quando entrou em vigor em 2013, a NBR 15.575-1 sofreu críticas por parte da comunidade científica e do mercado quanto às suas deficiências, que variam desde ambiguidades textuais até incompatibilidades encontradas entre o método simplificado e o método de simulação, ambas impactando consideravelmente nos resultados obtidos.

É diante deste cenário que KRELLING et. al propõem em 2020 um novo método de avaliação das condições térmicas das unidades habitacionais, desta vez considerando nas simulações as condições anuais ao invés dos dias típicos de verão e de inverno e adicionando os efeitos das cargas internas e da ventilação natural. Além disso, outra mudança proposta é a comparação do desempenho do edifício real com um edifício de referência, seguindo os moldes das normativas internacionais. (PEIXOTO & SOUZA, 2022)

Grande parte deste estudo foi incorporado na versão revisada de 2021 da norma, que tem como objetivo tornar

o método de simulação mais próximo do comportamento real da edificação e, ao mesmo tempo, minimizar inconsistências da metodologia. Sendo assim, o presente estudo visa comparar as metodologias de simulação das versões de 2013 e 2021 da NBR 15.575-1 a partir da avaliação do desempenho térmico de um edifício residencial vertical “padrão” da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP).

### Simulação

Para a comparação das metodologias de simulação de 2013 e 2021 da NBR 15.575-1, foi selecionado como estudo de caso o projeto de uma edificação habitacional multifamiliar atualmente em construção na cidade de Barueri, localizada na RMSP.

O edifício conta com unidades de 2 e 3 dormitórios, com aproximadamente 58 m<sup>2</sup> e 66 m<sup>2</sup> cada, distribuídas em 20 pavimentos, totalizando 120 unidades habitacionais (UH). As fachadas longitudinais estão orientadas para norte e sul e as transversais, para oeste e leste. Por conta de suas características, o empreendimento em questão pode ser considerado uma amostra da tipologia de médio padrão dos lançamentos verticais da cidade de São Paulo e dos municípios da RMSP.



Figura 1: Planta de vendas da unidade de 2 dormitórios (Divulgação: F&M Incorporadora)



Figura 2: Planta de vendas da unidade de 3 dormitórios (Divulgação: F&M Incorporadora)



Figura 3: Planta do pavimento tipo com identificação das unidades. Ambientes de permanência prolongada (APP) analisados em cinza claro.

As UH possuem janelas de correr com persiana integrada de 1,5 m<sup>2</sup> nos dormitórios e portas de correr de 7,7 m<sup>2</sup> e 4,3 m<sup>2</sup> nas salas das UH de 2 e 3 dormitórios, respectivamente. As cozinhas são integradas à sala e possuem uma porta de giro de 2,2 m<sup>2</sup>. Os apartamentos contam com varandas de 4,9 m<sup>2</sup> em frente às salas.

Quanto aos revestimentos externos, as fachadas do edifício são predominantemente em cinza claro (absortância 0,3) e trechos em destaque nas varandas e fachadas laterais em cinza escuro (absortância 0,7) conforme perspectiva da fachada na Figura 4.



Figura 4: Perspectiva artística da fachada do prédio (Divulgação: F&M Incorporadora)

Para os revestimentos internos e sistemas construtivos da edificação, as premissas utilizadas nas simulações termodinâmicas estão apresentadas na Tabela 1:

Tabela 1: Sistemas construtivos do projeto

Sistema	Composição	Condutância global (U-value)
Paredes externas	Argamassa 3cm Bloco de concreto 19cm Gesso projetado 1cm	2,70 W/m <sup>2</sup> .K
Paredes internas	Gesso projetado 1cm Bloco de concreto 14cm Gesso projetado 1cm	2,76 W/m <sup>2</sup> .K

Lajes internas	Contrapiso 3cm Concreto maciço 10cm Gesso projetado 1cm	3,40 W/m <sup>2</sup> .K
Cobertura telhado	Telha sanduíche EPS 30mm Camada de ar, R=0,18m <sup>2</sup> .K/W Contrapiso 5cm Concreto maciço 10cm Gesso 1cm	0,5 W/m <sup>2</sup> .K
Cobertura lazer	Contrapiso 5cm Concreto maciço 10cm Gesso 1cm	3,80 W/m <sup>2</sup> .K
Vidros	Monolítico incolor 4mm, Transmissão luminosa=89% e Fator solar= 85%	5,70 W/m <sup>2</sup> .K

### Caracterização climática

A cidade de Barueri não conta com arquivo climático próprio, sendo assim, a NBR 15.575-1 indica que sejam utilizados os dados de uma cidade da mesma zona bioclimática e, portanto, com características climáticas semelhantes. Desta forma, para as simulações foi usado o arquivo climático da cidade de São Paulo.

A partir da base de dados climáticos para um ano meteorológico típico (TMY) disponibilizada pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), verifica-se que São Paulo tem temperatura média anual de 20,5°C, mínima de 7,4°C e máxima de 34,6 °C. Esse padrão de temperaturas é semelhante para a maior parte dos municípios da RMSP. A Figura 5 apresenta o gráfico de temperaturas anuais para a localização.



Figura 5: Gráfico das temperaturas mensais para a cidade de São Paulo (CBE ClimaTool, 2021)

### Método

O trabalho apresentado consiste na comparação dos resultados obtidos nas simulações termodinâmicas para um edifício vertical residencial localizado na RMSP. Os estudos foram realizados a partir dos procedimentos de simulação apresentados nas versões de 2013 e de 2021 da NBR 15.575:1.

As análises foram feitas para o mesmo edifício, a partir de três modelos computacionais, um para a versão de 2013, e os demais para a versão de 2021 sendo eles o modelo real e o modelo de referência.

A partir dos resultados das simulações foi feita a verificação de desempenho para cada um dos procedimentos da norma e comparados e realizada uma análise comparativa entre os métodos.

### Procedimento de simulação NBR 15.575:1- 2013

Esta metodologia tem como premissa a análise das UH que demonstrem o pior cenário em relação à carga térmica

nos períodos de verão e inverno, e que estejam em condição de recebimento de radiação solar pela cobertura.

A análise foi feita para os ambientes de permanência prolongada, como salas e dormitórios, das UH selecionadas, escolhidas conforme indicação da norma:

- Unidade de verão: localizada no último pavimento ou pavimento de cobertura exposta à radiação. A unidade deve apresentar janela do dormitório ou da sala voltada para oeste e a outra parede exposta para norte. Caso não seja possível atender aos dois requisitos, a unidade deve ter pelo menos uma janela para oeste;
- Unidade de inverno: localizada no último pavimento ou pavimento de cobertura exposta à radiação. A unidade deve apresentar janela da sala de estar voltada para sul e a outra parede voltada para leste. Caso não seja possível, o ambiente deve ter pelo menos uma janela voltada para sul.



Figura 6: Planta do pavimento tipo (à esq.) e modelo da edificação (à dir.) no software Design Builder, conforme a metodologia de 2013.

Foram modelados todos os ambientes das unidades habitacionais analisadas e consideradas as trocas térmicas com o ambiente externo. O pavimento de análise foi modelado na mesma altura do projeto. Os dispositivos de sombreamento previstos em projeto tais como varandas, marquises, beirais e venezianas foram considerados na simulação. Não foi considerado o efeito do sombreamento das edificações ou vegetação do entorno.

Não foram considerados os ganhos de carga térmica provenientes da ocupação, iluminação ou equipamentos. Para a ventilação dos ambientes foi adotada uma taxa de renovações de ar por hora fixa conforme valores máximos permitidos pela norma: 1 renovação/hora para o período de inverno e 5 renovações/hora para o período de verão.

#### Procedimento de simulação NBR 15.575:1 - 2021

A metodologia de 2021 é baseada no desenvolvimento e comparação de dois modelos de simulação da edificação em análise: real e de referência.

O modelo real considerou todas as soluções construtivas da edificação de análise. Já o modelo de referência, possui as mesmas premissas volumétricas, alterando-se características do sistema construtivo, conforme dados da Tabela 2. O percentual de elementos transparentes também foi ajustado para os APP respeitando o percentual referencial de 17% da área de piso do ambiente. A área

efetiva de ventilação para todas as aberturas de APPs é de 45%. Estas premissas levarão à obtenção de um desempenho referencial, a ser superado pelo modelo real.

Tabela 2: Sistemas construtivos modelo de referência

Sistema	Condutância global (U-value)
Paredes externas com 10cm e absorvância=0,58	4,40 W/m <sup>2</sup> .K
Paredes internas com 10cm e absorvância igual ao modelo real	4,40 W/m <sup>2</sup> .K
Lajes internas com 10cm e absorvância igual ao modelo real	3,70 W/m <sup>2</sup> .K
Cobertura com telha de 6mm, camada de ar e laje interna 10cm	2,10 W/m <sup>2</sup> .K
Vidros com Fator Solar 87% e Transmitância luminosa 87%	5,70 W/m <sup>2</sup> .K

As simulações foram realizadas para um período anual, considerando o uso da ventilação natural, que leva em consideração o tipo de caixilho e seu percentual de ventilação efetiva, de modo a promover a ventilação a partir de parâmetros de velocidade e direção do vento, fornecidos pelo arquivo climático.

As simulações consideraram os ganhos de calor provenientes das seguintes cargas térmicas:

- Ocupação: Considerou-se dois ocupantes por dormitório. Para cada dormitório, considerou-se dois ocupantes na sala, com limite máximo de quatro ocupantes;
- Iluminação: Considerou-se densidade de potência instalada de 5 W/m<sup>2</sup> para cada APP;
- Equipamentos: Considerou-se a potência instalada de 120W nos APP sala ou uso misto;

Para avaliação da UH são analisados três indicadores de desempenho térmico: o Percentual de Horas ocupadas dentro de uma Faixa de Temperatura Operativa (PHFT), as Temperaturas Operativas ( $TO_{máx}$ ) e mínima ( $TO_{mín}$ ). Esses indicadores permitem a verificação quanto ao percentual de tempo em que a edificação apresenta temperaturas adequadas e quanto à ocorrência de temperaturas extremas.

Para as simulações foram analisadas todas as unidades habitacionais localizadas nos pavimentos representativos das condições térmicas da edificação, conforme estabelecido pela NBR 15.575-1: pavimento térreo, pavimentos tipo e pavimento de cobertura parcial ou totalmente exposta.

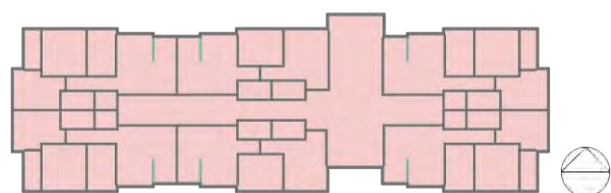


Figura 7: Planta do pavimento tipo no software Design Builder, conforme a metodologia de 2021.

Foram consideradas as trocas de calor entre as unidades e os demais pavimentos como subsolos, térreo e pavimento de lazer. Não foram modelados todos os pavimentos habitacionais, e, portanto, a altura do modelo não representa sua altura real. Para compatibilizar a proporção do modelo com sua condição real, as edificações do entorno, que passam a ser consideradas na metodologia de 2021, foram reduzidas proporcionalmente ao modelo analisado.

Quando previstos no projeto, os dispositivos de sombreamento externos como para-sóis, marquises, beirais e venezianas, foram considerados apenas no modelo real.

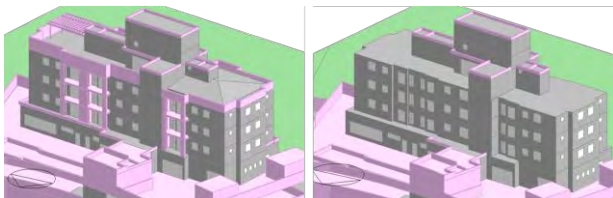


Figura 8: Modelos real (à esq.) e de referência (à dir.) com altura equivalente aos pavimentos de análise, no software Design Builder, conforme a metodologia de 2021.

### Software

A modelagem da geometria e aplicação dos materiais foram realizadas com o software Design Builder v3. Para os cálculos termodinâmicos foi utilizado o programa Energy Plus v9.4, que permite a determinação do comportamento térmico de edificações sob condições dinâmicas de exposição ao clima e é capaz de produzir efeitos de inércia térmica. O software é validado pela ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) Standard 140, conforme preconiza a NBR 15.575-1.

### Resultados

As Tabelas 3 e 4 apresentam, respectivamente, para a unidade de verão e de inverno, os resultados das simulações termodinâmicas com base na metodologia de 2013.

Para a análise de inverno, o valor mínimo diário da temperatura interna do ar nos ambientes de longa permanência deve ser sempre maior ou igual ao valor mínimo da temperatura externa acrescido de 3°C. Portanto, para o caso de Barueri-SP, a temperatura interna deve ser maior ou igual a 9,2°C.

Para a análise de verão, o valor máximo da temperatura interna do ar nos ambientes deve ser sempre maior ou igual ao valor máximo da temperatura externa, para o caso de Barueri-SP, a temperatura máxima deve ser maior ou igual a 31,9°C.

No estudo de caso analisado todas as unidades atenderam aos requisitos de desempenho mínimo.

Tabela 3: Temperaturas internas para a unidade de verão – Metodologia 2013

Ambiente	Temp. máximas	Temp. máx. para atendimento
Estar	30,7 °C	31,9 °C
Dormitório 1	31,0 °C	
Dormitório 2	31,9 °C	
Dormitório 3	30,8 °C	

Tabela 4: Temperaturas internas para a unidade de inverno – Metodologia 2013

Ambiente	Temperaturas mínimas	Temp. mín. para atendimento
Estar	9,8 °C	9,2 °C
Dormitório 1	9,2 °C	
Dormitório 2	9,3 °C	
Dormitório 3	9,4 °C	

A Tabela 5 apresenta os resultados de um dos três requisitos para atendimento ao nível de desempenho mínimo com base no procedimento de simulação da metodologia 2021.

O PHFT avalia o percentual de horas em que a unidade habitacional se encontra dentro de uma faixa de temperatura operativa, obtida com base na média anual da temperatura externa de bulbo seco.

Para atendimento ao critério no nível mínimo, as simulações do modelo real devem apresentar, ao longo de um ano e durante os períodos de ocupação dos ambientes de análise, um valor superior a 90% do valor obtido para o modelo de referência. No estudo de caso analisado todas as unidades analisadas atenderam a este critério.

Tabela 5: Percentual de horas dentro de uma faixa de temperatura operativa (PHFT) – Metodologia 2021

Unidade	Modelo de referência	Valor para atendimento	Modelo Real
2P – UH 1	63%	57%	78%
2P – UH 2	64%	58%	81%
2P – UH 3	70%	63%	83%
2P – UH 4	72%	65%	81%
2P – UH 5	70%	63%	85%
2P – UH 6	63%	57%	82%
5P – UH 1	63%	57%	82%
5P – UH 2	62%	56%	76%
5P – UH 3	62%	56%	78%
5P – UH 4	70%	63%	84%
5P – UH 5	74%	67%	82%
5P – UH 6	70%	63%	86%
21P – UH 1	58%	53%	68%
21P – UH 2	58%	53%	69%
21P – UH 3	65%	59%	81%
21P – UH 4	69%	62%	81%
21P – UH 5	65%	59%	85%
21P – UH 6	55%	50%	84%

As Tabelas 6 e 7 apresentam, respectivamente, os resultados para os critérios de temperatura operativa máxima ( $TO_{\max}$ ) e mínima ( $TO_{\min}$ ). Esse critério avalia os

extremos de temperaturas obtidos durante os períodos de ocupação dos ambientes de permanência prolongada.

Para atendimento aos níveis de desempenho as simulações devem apresentar  $TO_{\max}$  do modelo real menor ou igual à obtida para o modelo de referência, após somado um valor de tolerância ( $1^{\circ}\text{C}$  para unidades localizadas nos pavimentos térreo e intermediários,  $2^{\circ}\text{C}$  para unidades com cobertura exposta). Todas as unidades analisadas no estudo de caso atenderam a este critério.

Tabela 6: Temperaturas operativas máximas  $TO_{\max}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) – Metodologia 2021

Unidade	Modelo de referência	Valor para atendimento	Modelo Real
2P – UH 1	33,2	34,2	32,3
2P – UH 2	33,0	34,0	32,3
2P – UH 3	33,1	34,1	32,1
2P – UH 4	32,8	33,8	32,2
2P – UH 5	33,8	34,8	32,2
2P – UH 6	33,7	34,7	32,1
5P – UH 1	33,7	34,7	32,1
5P – UH 2	33,4	34,4	32,5
5P – UH 3	33,2	34,2	32,5
5P – UH 4	33,2	34,2	32,1
5P – UH 5	32,7	33,7	32,1
5P – UH 6	33,8	34,8	32,0
21P – UH 1	34,2	36,2	36,1
21P – UH 2	34,6	36,6	36,5
21P – UH 3	34,9	36,9	32,9
21P – UH 4	34,3	36,3	32,4
21P – UH 5	34,8	36,8	32,3
21P – UH 6	34,8	36,8	32,0

O critério de  $TO_{\min}$  é exigido apenas para edificações localizadas nas zonas bioclimáticas 1, 2, 3 e 4, como o caso de Barueri-SP. Para atendimento aos níveis de desempenho, as simulações devem apresentar  $TO_{\min}$  do modelo real maior ou igual à obtida para o modelo de referência, após reduzido um valor de tolerância de  $1^{\circ}\text{C}$ . As unidades 1 e 2 do pavimento de cobertura não atenderam ao critério.

Tabela 7: Temperaturas operativas mínimas  $TO_{\min}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) – Metodologia 2021

Unidade	Modelo de referência	Valor para atendimento	Modelo Real
2P – UH 1	18,0	17,0	17,2
2P – UH 2	17,5	16,5	16,6
2P – UH 3	16,2	15,2	15,8
2P – UH 4	16,3	15,3	16,0
2P – UH 5	16,5	15,5	15,9
2P – UH 6	17,7	16,7	17,0
5P – UH 1	17,7	16,7	17,0
5P – UH 2	18,3	17,3	17,9
5P – UH 3	18,2	17,2	17,3
5P – UH 4	16,5	15,5	16,1
5P – UH 5	16,4	15,4	16,4
5P – UH 6	16,7	15,7	16,4
21P – UH 1	18,0	17,0	16,0
21P – UH 2	17,2	16,2	15,5
21P – UH 3	15,3	14,3	15,4
21P – UH 4	15,0	14,0	15,9
21P – UH 5	15,7	14,7	16,1
21P – UH 6	17,6	16,6	17,5

## Discussão

De acordo com os resultados obtidos nas simulações, destaca-se que, quanto ao atendimento aos requisitos mínimos de desempenho térmico da NBR 15.575-1, o empreendimento atende aos requisitos da metodologia de 2013 e não atende aos requisitos da metodologia de 2021.

As unidades que deixaram de atender na metodologia de 2021 não são as unidades tidas como críticas na metodologia de 2013. Um dos fatores para essa diferença se dá por conta da escolha da UH a ser analisada na versão antiga na NBR 15.575-1 não considerar os sistemas construtivos da envoltória, apenas a orientação das fachadas e janelas. No edifício analisado as UH críticas possuem como cobertura a telha sanduíche com isolamento térmico, enquanto as UH que não passaram na nova metodologia estão localizadas abaixo dos ambientes de lazer e não possuem isolamento.

Uma diferença importante entre as metodologias relaciona-se à variável de temperatura. Na versão de 2013 é observada a temperatura do ar, enquanto a versão de 2021 tem como parâmetro a temperatura operativa, como ocorre na análise de conforto térmico na ASHRAE 55 e na norma europeia EN 15251. A temperatura operativa é resultante da temperatura do ar interna e da temperatura radiante média, variando de acordo com a velocidade do ar, sendo também considerada a contribuição de cargas internas de ocupação, iluminação e equipamentos. Assim, ao desconsiderar a temperatura operativa, a metodologia de 2013 se afasta da realidade pós-ocupação do edifício, uma vez que o ganho térmico da edificação devido à incidência de radiação solar, assim como os ganhos decorrentes das cargas internas, são variáveis significativas para o desempenho térmico da edificação. Em decorrência desse fator, na nova metodologia é possível verificar que as temperaturas resultantes do critério  $TO_{\max}$  estão fora do limite estabelecido pela versão de 2013 e, ainda assim, atende aos novos requisitos. De maneira análoga, as unidades que não atendem ao critério de  $TO_{\min}$  possuem temperaturas dentro dos recomendados pela antiga metodologia. Isto é possível devido a comparação entre o modelo real e o modelo de referência.

O modelo de referência apresenta sistemas construtivos simples e com alta condutância global, permitindo que o desempenho do modelo real se sobressaia a partir da aplicação de sistemas construtivos mais eficientes e isolantes. Outro ponto de destaque é a ausência de elementos de sombreamento no modelo de referência, considerando-os uma importante estratégia de melhoria do desempenho térmico da edificação. A análise comparativa entre os ganhos de carga térmica dos modelos apresentada na Figura 10 mostra que a principal diferença entre os ganhos é decorrente das superfícies transparentes. Dessa forma, ainda que o modelo de referência possua menor área de vidro, a falta de elementos sombreadores faz com que seu ganho seja aproximadamente o dobro do modelo que real - que possui áreas transparentes maiores, porém sombreadas.

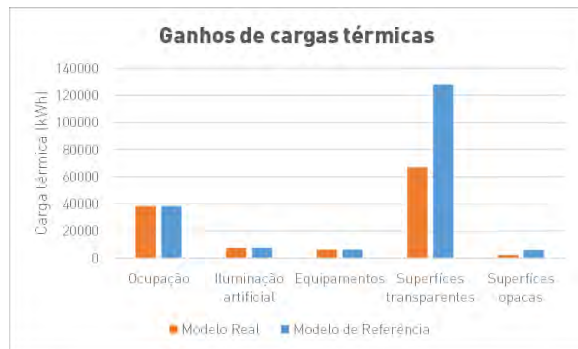


Figura 10: Gráfico comparativo dos ganhos de cargas térmicas nos modelos real e de referência - Metodologia 2021

Essa comparação, mensurando os efeitos do sombreamento e outras estratégias bioclimáticas, só é possível ser observada nas simulações termodinâmicas, uma vez que o método simplificado, apresentado na NBR 15.575-1, apenas avalia o desempenho térmico por meio da comparação de características geométricas dos APP e de propriedades térmicas dos sistemas construtivos em relação aos valores de referência destes parâmetros.

## Conclusão

Através das simulações computacionais desenvolvidas com auxílio dos softwares DesignBuilder v3 e EnergyPlus v9.4 foi possível analisar de maneira comparativa as versões de 2013 e 2021 da metodologia de desempenho térmico presente na NBR 15.575-1.

As deficiências da metodologia de 2013, ao deixar de considerar aspectos importantes para o desempenho térmico da edificação, dificultam a comparação direta entre as duas versões da norma. De todo modo, pode-se dizer que a metodologia de 2021 apresenta condições de simulação e de análise mais alinhadas com a realidade. Além disso, a comparação com um modelo de referência caminha de acordo com outras normativas internacionais já consolidadas como referências técnicas e teóricas.

Sendo assim, a partir do estudo de caso, foi possível identificar os avanços que o novo procedimento de simulação representou em relação a seu precedente, permitindo uma análise mais abrangente por meio de simulações anuais, identificando o percentual de horas com temperaturas adequadas para o clima local, assim como a identificação de temperaturas operativas extremas. Ao considerar as cargas térmicas de ocupação, iluminação e equipamentos a simulação se aproxima de condições realistas de uso e ocupação da edificação. Já a comparação com o modelo de referência permite não só avaliar como também incentivar a adoção de estratégias bioclimáticas de forma a melhorar o desempenho térmico do edifício.

A mudança no procedimento de simulação trouxe maior complexidade às simulações termodinâmicas, sendo também um indicativo de aumento de valor e tempo dos serviços prestados por consultores para verificação de atendimento. O aumento da complexidade do novo procedimento é também impactado quando observados os

padrões dos lançamentos de edifícios habitacionais verticais na RMSP, que costumam apresentar mais de 4 unidades por andar, variações tipológicas dentre os pavimentos e conjuntos habitacionais com mais de uma torre.

Tal complexidade, no entanto, não garante que a norma tenha se tornado mais ou menos permissiva. A constante avaliação do método é necessária a fim de compreender seu impacto e limitações no mercado da construção civil, que está diretamente ligado às normativas propostas.

## Referências

- American Society Of Heating, Refrigerating And Air-Conditioning Engineers. ASHRAE 55 Handbook – Fundamentals. Atlanta, 2020.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas (ABNT): Edificações habitacionais. Desempenho: NBR 15.575 parte 1: Requisitos gerais. Emenda 1:2021. Rio de Janeiro, 2021. 48p.
- \_\_\_\_\_.Desempenho: NBR 15.575 parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro.2013. 71p.
- \_\_\_\_\_.Desempenho térmico de edificações: NBR 15.220
- Betti, G., Tartarini, F., Schiavon, S., Nguyen, C. (2021). CBE Clima Tool. Version 0.6.6. Center for the Built Environment, University of California Berkeley.
- COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. EN 15251: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. Brussels, 2007.
- Krelling, Amanda F.; Eli, Letícia G.; Olinger, Marcelo S.; Veiga, Rodolfo K.S.; Melo, Ana P.; Lamberts, Roberto. Proposta de método de avaliação do desempenho térmico de residências: NBR 15575. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 18., 2020, Porto Alegre. Anais...Porto Alegre: ANTAC, 2020.
- PBE EDIFICA. Manual para Aplicação do RTQ-R. Disponível em: <<http://www.pbeedifica.com.br/etiquetagem/residencial/manuais>> Acesso em 20 de setembro de 2021.
- Peixoto, Luiza B. Souza, Roberta V.G, Desempenho térmico pela ABNT NBR 15575: versões 2013 e 2021. Rev. Sítio Novo Palmas v. 6 n. Edição Especial p. 149-160 mar. 2022. e-ISSN: 2594-7036. Disponível em: <<https://sitionovo.ifto.edu.br/index.php/sitionovo/article/view/1202>> Acesso em 26 de nov. de 2022.

## Análise do tempo de estabilização do ambiente térmico de uma câmara climática em Florianópolis/SC por meio de simulação computacional

Natasha Hansen Gapski, Liége Garlet, Brenda da Costa Loeser, Mateus Vinícius Bavaresco, Ana Paula Melo, Roberto Lamberts  
Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil

### Resumo

Em ambientes controlados, as variáveis que afetam a temperatura operativa devem ser simultaneamente monitoradas. O ajuste da temperatura do ar é insuficiente para caracterizar um ambiente termicamente. O objetivo deste trabalho é analisar diferentes configurações de *setpoint* e *schedules* de funcionamento de condicionadores de ar em uma câmara climática localizada em Florianópolis, Brasil. Com base em simulações computacionais com o programa EnergyPlus, demonstrou-se que a definição direta do *setpoint* desejado exige mais tempo para estabilizar as temperaturas. Observou-se a necessidade de um pré-condicionamento da câmara para reduzir o tempo de estabilização das temperaturas superficiais.

### Introdução

A avaliação do conforto térmico em ambientes internos é baseada em variáveis humanas, como a atividade metabólica e a vestimenta; e parâmetros que descrevem termicamente o ambiente, como a umidade relativa, velocidade do ar, temperatura do ar e temperatura radiante média (FANGER, 1970).

Os parâmetros ambientais podem ser gerenciáveis com o uso de condicionamento artificial para ambientes internos. O controle da temperatura do ar a partir da configuração do termostato dos sistemas de condicionamento artificial favorece a satisfação psicológica dos usuários (MOON; HAN, 2011). Entretanto, o ajuste da temperatura não é suficiente para a previsão de modelos de conforto térmico, pois não garantem a uniformidade do espaço (RUPP, VÁSQUEZ, LAMBERTS, 2015).

Avaliações em ambientes controlados podem apresentar investigações mais detalhadas sobre os ocupantes destes espaços e suas percepções, assim como sobre o comportamento das variáveis ambientais (PISELLO et al., 2021). Para tanto, o controle destas salas deve envolver o monitoramento de todos os parâmetros descritores do ambiente.

As variáveis que influenciam o ambiente térmico, como a temperatura radiante média (TRM), são significativas para o controle da temperatura interna, principalmente em ambientes com alta exposição solar. O efeito radiante de

superfícies quentes ou frias afetam a sensação de conforto, causando sensações que a temperatura do ar não é capaz de mensurar (ALFANO et al., 2013). A temperatura operativa compreende a temperatura do ar e a temperatura radiante média e em espaços com velocidade do ar abaixo de 0,2 m/s é calculada pela média das duas (ABNT, 2021).

Portanto, além do controle de temperatura do ar, é desejável manter as temperaturas superficiais internas em níveis adequados para não produzir desconforto por assimetria na temperatura radiante. Para auxiliar esta manutenção da temperatura, estratégias de pré-resfriamento são sugeridas para otimizar o tempo e o consumo energético do condicionamento do ar (WANG, TANG, SONG, 2022).

Neste contexto, o Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) está executando uma câmara climática para realização de testes em conforto humano. A avaliação do desempenho térmico deste ambiente controlado torna-se imprescindível para direcionar os testes de conforto humano a serem desenvolvidos nesta sala.

O objetivo deste trabalho é analisar diferentes cenários de configuração de *setpoint* para atingir a temperatura interna de 24 °C no projeto de câmara climática do LabEEE por meio de simulação computacional. A análise inclui a avaliação das condições térmicas dos cenários pelas variáveis de temperatura do ar, temperatura superficial, temperatura radiante média e temperatura operativa. Além disso, testar a estratégia de implementar um período de pré-resfriamento na sala de testes.

### Metodologia

O objeto de estudo deste trabalho é uma câmara climática em construção, localizada dentro de uma sala no segundo pavimento do prédio da Engenharia Civil da UFSC em Florianópolis. A Figura 1 apresenta a planta baixa da antessala e da câmara climática.

O espaço foi projetado em *steel frame*, com paredes sanduíche revestidas por placas de gesso de 1,25 cm de espessura e 10 cm de isolamento interno em lã de vidro. O forro ficará a uma distância de 30 cm da laje do terceiro pavimento do edifício, com fechamento composto por

placa de gesso para área interna e isolante térmico (10 cm). O piso recebe o isolamento térmico logo acima da laje de concreto do edifício e fechamento em placas cimentícias de espessura 2,5 cm. As propriedades termofísicas dos materiais são apresentadas na Tabela 1. A câmara climática também possui uma janela de abrir/tomar composta por vidros duplos de 6 mm e câmara de ar de 12 mm entre eles.

Tabela 1: Propriedades termofísicas dos materiais

Materiais	Espessura (cm)	Condutividade Térmica (W/m.K)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Calor específico (J/kg-K)	Absortância Térmica	Absortância Solar
Placa cimentícia	2,5	0,5	1520	1000	0,9	0,2
Placa gesso externo	1,25	0,187	800	1000	0,9	0,3
Placa gesso interno	1,25	0,25	1000	1000	0,9	0,3
Lã de vidro	10	0,045	50	700	0,9	0,7
Chapa fibra de madeira	0,6	0,15	560	2500	0,9	0,3
Cerâmica (tijolo)	1,3	0,9	1600	920	0,9	0,3
Argamassa	2,5	1,15	2000	1000	0,9	0,3
Concreto (laje)	12	1,75	2000	1000	0,9	0,3

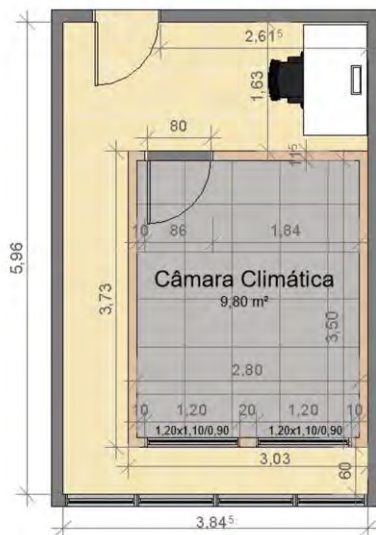


Figura 1: Planta baixa da sala da câmara climática

Para a avaliação do ambiente térmico da câmara climática, caracterizado pelas temperaturas do ar, superficiais e radiantes média, utilizou-se simulação

computacional com o *software* EnergyPlus v.9.4. Neste programa, foram configurados os materiais e suas propriedades térmicas; cargas internas durante o horário de ocupação de 9.7 W/m<sup>2</sup> para o sistema de iluminação e uma pessoa em atividade de escritório (110 W); e o sistema de climatização ideal (*IdealLoads*) para a câmara e a antessala em que ela está locada.

As simulações foram realizadas para a cidade de Florianópolis/SC com uso do arquivo climático INMET (CLIMATE ONE BUILDING, 2022), considerando os dados da semana mais quente do ano, de 27 de janeiro a 2 de fevereiro. Foram avaliadas as variações da temperatura interna nos dias 30 e 31 de janeiro e 1 de fevereiro desta semana, a fim de garantir um período de inicialização das simulações nos primeiros dias.

Na modelagem para simulação computacional foi considerada a geometria das salas imediatamente abaixo, acima e ao lado da antessala que abriga a câmara climática. Os materiais destes ambientes são compostos por divisórias laterais em chapas rígidas de fibras de madeira, laje de concreto, parede externa de tijolo cerâmico com revestimento em argamassa e janela de vidro simples 3 mm.

A metodologia de análise compreendeu dois grupos de simulações. O primeiro refere-se à simulação de quatro cenários com temperatura de *setpoint* fixada em 24°C:

- Cenário 1: funcionamento durante o dia (8h às 18h) e antessala sem condicionamento de ar;
- Cenário 2: câmara e antessala condicionadas em 24 °C durante o dia (8h às 18h);
- Cenário 3: funcionamento contínuo da câmara e antessala sem condicionamento de ar;
- Cenário 4: funcionamento contínuo da câmara e antessala condicionadas em 24 °C durante o dia (8h às 18h).

Os resultados deste grupo foram avaliados considerando a temperatura do ar e as temperaturas radiantes médias. Foi observado o comportamento dos cenários frente a configuração de uniformidade térmica durante o período de ocupação da câmara (8h às 18h). Isto é, se em diferentes momentos do dia a câmara apresenta condições térmicas semelhantes.

O segundo grupo de simulações envolveu a simulação do cenário 2 com ajuste da temperatura de *setpoint* da câmara em 18 °C. Os resultados desta simulação em relação ao tempo de redução das temperaturas superficiais resultaram na elaboração de dois casos de combinação de *setpoint* (agendas de funcionamento A e B).

Assim, foi configurado o pré-condicionamento da sala de testes, com definição de um *setpoint* mais baixo para a temperatura, em 18°C, por um período suficiente para reduzir as temperaturas superficiais médias até 25°C e 24 °C. A agenda A, com *setpoint* inicial de 18 °C por 1h e na agenda B por 1h30 a partir da ocupação (às 8h). Após



este período inicial, o *setpoint* foi mantido em 24 °C até às 18h.

## Análise dos Resultados e Discussão

### Cenários de 1 a 4

Os primeiros resultados referem-se às simulações dos quatro cenários avaliados. A Figura 2 mostra os resultados da temperatura radiante média dos três dias de verão avaliados. Os pares de cenários: 1 e 2, em vermelho; 3 e 4, em azul, apresentam temperaturas do ar próximas, uma vez que seguem a mesma agenda de operação (*schedule*). Observa-se que o *setpoint* de 24 °C não é suficiente para igualar a temperatura radiante neste mesmo valor.

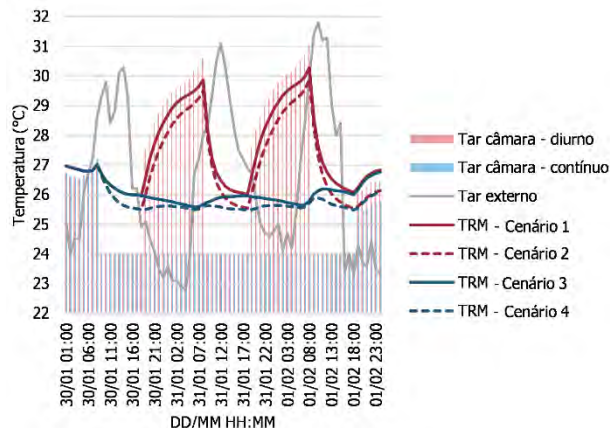


Figura 2: Temperatura do ar e temperatura radiante média dos cenários 1-4

Ainda que o perfil construtivo da câmara climática garanta um alto isolamento (transmitância térmica de 0,41 W.m<sup>2</sup>.K<sup>-1</sup> na composição do teto e 0,46 W.m<sup>2</sup>.K<sup>-1</sup> paredes e piso), as trocas de calor por condução e a infiltração são notáveis, pois o condicionamento da antessala (cenários 2 e 4) contribui para maior redução das temperaturas operativas do que em cenários sem ar condicionado (cenários 1 e 3).

Nota-se, ainda, que a temperatura do ar atinge, em menos de 30 minutos, o *setpoint* indicado (Figura 2), devido à configuração de um sistema de ar condicionado ideal das simulações. No entanto, as temperaturas das superfícies de paredes, piso e do teto da câmara climática são mais elevadas devido ao ganho de calor da edificação.

Em relação às distribuições das temperaturas superficiais do interior da câmara climática, os quatro cenários avaliados apresentaram variação máxima menor que 1 °C e média menor que 0,5 °C entre superfícies. A Figura 3 apresenta o intervalo entre a superfície interna de maior e menor temperatura nos cenários de 1 a 4. A variação foi verificada predominantemente na comparação das superfícies do teto e do piso, em que o teto apresentou as temperaturas superficiais mais elevadas e o piso as mais baixas.

Na operação de um condicionador de ar durante um período contínuo, nota-se que a temperatura operativa se mantém próxima de 25 °C durante o período analisado,

indicando a estabilização da temperatura radiante média em um nível próximo de 26 °C. Nesta configuração, garante-se uma temperatura operativa estável durante o período de ocupação.

O condicionamento de ar operado com a ocupação requer um estágio de adaptação para estabilizar as temperaturas superficiais da câmara climática em 26 °C. Nos cenários com *setpoint* de 24 °C e operação apenas diurna, o tempo de adaptação médio ultrapassa 4h.

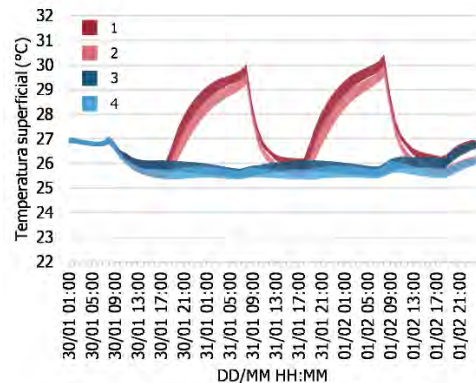


Figura 3: Intervalo de temperaturas superficiais máxima e mínima nos cenários 1-4

### Agendas A e B

Respeitando o horário de funcionamento usual do laboratório, considerou-se o acionamento do condicionador de ar em uma temperatura de 18 °C, a fim de reduzir as temperaturas superficiais da

câmara climática em menor tempo. A Tabela 2 mostra o tempo necessário para atingir uma temperatura superficial média de 24 °C e 25 °C nos três dias de verão avaliados. A média de temperatura superficial provém de todas as superfícies internas da câmara climática: paredes, piso e teto.

Tabela 2: Tempo de redução das temperaturas superficiais com ar condicionado em 18 °C

Dia	30/jan	31/jan	01/fev	Média (°C)
Temperatura do ar externo às 8h	28,6	28,0	30,0	28,9
Temperatura superficial às 8h	27,0	28,7	29,1	28,3
	Tempo (min)			Média (min)
Temperatura superficial 25 °C	40	60	70	57
24 °C	70	80	90	80

A partir da média de tempo encontrada para cada temperatura, foram simulados cenários com *setpoint* inicial de 18 °C nas primeiras 1h (A) a 1h30 (B) de ocupação diurna (às 8h). Após este período inicial, o *setpoint* foi ajustado em 24 °C no restante do dia, simulando um cenário de preparação da câmara climática para os estudos de conforto ambiental.

Para esta análise, foram plotadas as curvas de temperatura radiante média e operativa. Embora a temperatura radiante seja definida pelas temperaturas superficiais da

câmara climática devido ao volume da sala, também sofre influência das cargas internas no ambiente.

A Figura 4 apresenta os resultados para a configuração de agenda A, com *setpoint* de 18 °C das 8h às 9h e considerando a antessala condicionada ou não. Observa-se que a TRM exibe baixa variação durante o dia, com rápida estabilização da temperatura em torno de 26°C. O condicionamento do ar da antessala contribuiu para estabilizar a TRM em valores em média 0,4°C mais baixos do que nas situações sem condicionamento.

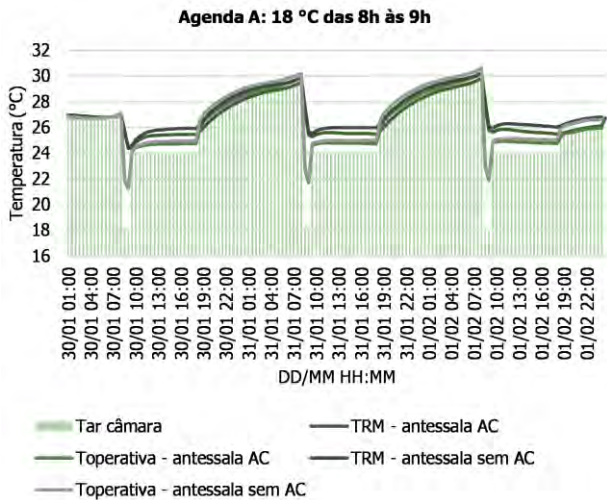


Figura 4: TRM e temperatura operativa com a agenda A e a antessala condicionada (AC) ou não (sem AC)

A Figura 5 apresenta os resultados para a agenda de operação B, das 8h às 9h30 com *setpoint* de 18 °C e das 9h30 às 18h com *setpoint* de 24 °C. Nesta configuração, as temperaturas operativas e radiantes, assim como na agenda A, estabilizaram com valores próximos de 25°C e 26 °C, respectivamente. No entanto, verifica-se que a elevada redução das temperaturas superficiais no horário inicial de ocupação aumentou o tempo para estabilização da temperatura no *setpoint*, quantificado pela diferença de temperatura em cada intervalo de tempo.

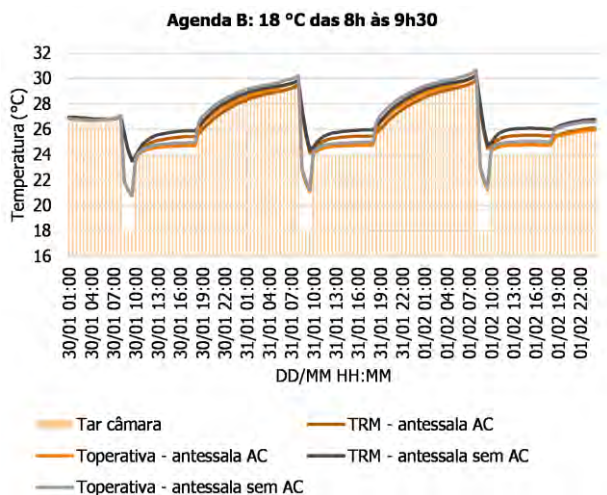


Figura 5: TRM e temperatura operativa com a agenda B e a antessala condicionada (AC) ou não (sem AC)

Estes resultados sugerem que há um tempo ótimo de pré-condicionamento da câmara climática. Uma vez que as temperaturas externas e internas da câmara tendem a um equilíbrio em uma temperatura operativa de aproximadamente 25 °C nas condições avaliadas, a redução das temperaturas superficiais abaixo deste nível não produz maior constância das condições térmicas, mas aumentam o tempo de estabilização.

## Conclusão

Estudos em ambientes controlados requerem o domínio das diferentes variáveis físicas que influenciam a percepção de conforto ambiental do usuário. O ambiente térmico é composto não somente pela temperatura do ar, mas também pela temperatura radiante média, umidade relativa do ar e velocidade do ar. A temperatura operativa engloba a temperatura do ar e a radiante média em uma média simples, facilitando a interpretação conjunta destas variáveis.

Neste contexto, o controle da temperatura do ar não garante um ambiente estável em relação às demais variáveis. A simulação de diferentes configurações do sistema de ar condicionado em quatro cenários com temperaturas de *setpoint* de 24 °C mostraram que embora o ar permaneça nesta temperatura, as temperaturas radiantes demoram pelo menos 4h para baixar a 26°C com acionamento do sistema somente no período diurno de ocupação.

Esta análise revelou que somente a operação contínua do sistema de ar condicionado com *setpoint* de 24 °C é suficiente para manter as temperaturas superficiais próximas de 26°C.

A segunda análise realizada mostrou o efeito da utilização de um pré-condicionamento da sala de teste. O pré-condicionamento consistiu na definição de um *setpoint* de baixa temperatura (18 °C) por um período suficiente para reduzir as temperaturas superficiais médias até 25 °C e 24 °C - 1h e 1h30, respectivamente.

Os resultados desta análise indicaram que a identificação da temperatura radiante ou da temperatura superficial de estabilização pode ser utilizada para definir um tempo ótimo de pré-condicionamento. O uso desta estratégia evita a exigência de operação contínua do ar condicionado e reduz o tempo necessário para a estabilização das temperaturas, a fim de produzir condições regulares para os experimentos de conforto ambiental.

Ressalta-se que este trabalho se trata de uma análise preliminar, que se limitou a uma semana de verão e a apenas uma temperatura de *setpoint* em um sistema de ar condicionado ideal. A construção da câmara climática permite que estes resultados sejam validados por meio de experimentos *in loco*.

Para trabalhos futuros, sugere-se a simulação de outras condições climáticas e cargas internas. A identificação do tempo ótimo em relação às temperaturas externas também é um ponto de interesse, pois esta variável é de fácil

monitoramento para a aplicação da estratégia de pré-condicionamento em campo.

## Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Brasil.

Agradecemos também à Saint-Gobain Brasil pela doação dos materiais e mão-de-obra para a construção da Câmara Climática. À Daikin Brasil e à Sicflux pela doação do sistema de HVAC, e às demais empresas que colaboraram com este projeto.

## Referências

- Alfano, F.R. et al. On the measurement of the mean radiant temperature and its influence on the indoor thermal environment assessment. *Building and Environment* 63 (2013) 79-88.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT. NBR 16401-2: Instalações de condicionamento de ar — Sistemas centrais e unitários. Parte 2: Parâmetros de conforto térmico. Projeto de revisão da norma. 2021. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/210126%20PROJETO%2016401-2.pdf>. Acesso em: 5 dez. 2022.
- Climate One Building. Arquivos Climáticos. Disponível em: [https://climate.onebuilding.org/WMO\\_Region\\_3\\_South\\_America/BRA\\_Brazil/index.html](https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_3_South_America/BRA_Brazil/index.html). Acesso em: 1 dez. 2022.
- Fanger P. O. Thermal comfort. Copenhagen: Danish Technical Press; 1970.
- Moon, J. W. and S.H. Han. Thermostat strategies impact on energy consumption in residential buildings. *Energy and Buildings* 43 (2011) 338–346.
- Pisello, A. L. et al. (2021). Test rooms to study human comfort in buildings: A review of controlled experiments and facilities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 149, 111359.
- Rupp, R.F.; N.G. Vásquez and R. Lamberts. A review of human thermal comfort in the built environment. *Energy and Buildings* 105 (2015) 178–205.
- Wang J.; C.Y. Tang; L. Song. Analysis of precooling optimization for residential buildings. *Applied Energy* 323 (2022) 119574.

## Simulação como instrumento para melhorar o desempenho da edificação e o conforto do usuário: O caso do Aeroporto de Macaé

Cristiane Rossatto Candido<sup>1</sup>, Caroline Casarin Lohnhoff<sup>1</sup>, Caroline Viana de Souza<sup>1</sup>, Larissa Azevedo Luiz<sup>1</sup>, Raquel Sanches<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ca2 Consultores Ambientais Associados

### Resumo

O desempenho ambiental das edificações está diretamente relacionado às condições climáticas locais, ressaltando a importância das simulações orientando as estratégias projetuais. O objetivo desse trabalho é analisar o impacto das simulações no projeto de arquitetura e sistemas, tendo como estudo de caso o Aeroporto de Macaé-RJ. Foram realizadas simulações computacionais para avaliação do desempenho lumínico a partir das métricas sDA e ASE, conforto térmico através das métricas PMV/PPD e eficiência energética baseado na ASHRAE 90.1. Os resultados demonstraram ações projetuais que culminaram em uma edificação com até 4% de economia de energia e bons índices de conforto térmico e lumínico.

### Introdução

A fim de estudar melhorias na no desempenho de edificações, é comum utilizar-se de simulações. Estas, podem avaliar diferentes atributos da edificação como a envoltória, diminuição do consumo de energia, otimização da iluminação natural e conforto acústico e térmico.

Vários estudos analisam diferentes estratégias de projeto como é o caso de Rupp e Ghisi (2013a) e Rupp e Ghisi (2013b) que estudaram tanto a ventilação híbrida sozinha (RUPP; GHISI, 2013b), quanto a associação de ventilação híbrida com iluminação natural (RUPP; GHISI, 2013a), a fim de mensurar a demanda de energia requerida para edificações comerciais. No primeiro caso (RUPP; GHISI, 2013b) foi obtida, com uso de simulação, redução de até 31,9% no consumo de energia e no segundo (RUPP; GHISI, 2013a), até 64,9%.

O que esses estudos provam é que a simulação fornece dados suficientes para elaborar uma arquitetura que proporciona maior qualidade ambiental e conforto ao usuário e gera benefícios financeiros com economia de energia e recursos.

### Objetivo

O objetivo desse estudo é analisar o impacto das simulações no desenvolvimento da arquitetura e sistemas de uma edificação de uso para Aeroporto da cidade de Macaé-RJ.

### Método

A fim de indicar melhores condições para a edificação, o estudo em questão fez a análise da edificação através das simulações computacionais para definição de sistemas de sombreamento, aberturas para ventilação natural, isolamento térmico e desempenho acústico, materiais de desempenho térmico, controle de cargas térmicas e controles dos sistemas da edificação como climatização e iluminação artificial.

### Simulação de iluminação natural

Para realização da simulação de iluminação natural do Aeroporto Macaé foram utilizadas as recomendações da IESNA, relevantes para edificações de aeroportos. São elas:

- Integração entre iluminação natural e sistemas de iluminação artificial;
- Controle de ofuscamento de luz direta;
- Boa distribuição e uniformidade de luz nas superfícies;

A norma IES LM-83-12 baseia-se na análise de duas métricas anuais de desempenho, a autonomia espacial de luz natural (sDA) e a exposição anual à luz solar. Através dessas análises é possível avaliar os níveis mínimos de iluminação natural durante todo o ano e o potencial de penetração excessiva de luz solar que eleva os riscos de desconforto visual por ofuscamento.

A autonomia espacial de luz natural (sDA) descreve a porcentagem da área em análise que atinge um nível mínimo de iluminância durante uma fração das horas de ocupação anuais.

E a exposição anual à luz solar descreve o potencial de desconforto visual em ambientes de trabalho internos. É definido como a porcentagem de uma área de análise que excede 1000 lux de iluminância solar direta em mais do que 250 horas ocupadas no ano. Essa análise é complementar e deve ser analisada em conjunto com a autonomia espacial de luz natural.

Há dois níveis de desempenho aceitáveis, de acordo com a LM-83-12, para luz natural:

1. Aceitável: o edifício em estudo deve atingir 300 lux em 50% das horas ocupadas em pelo menos 55% da área em análise.
2. Recomendável: o edifício em estudo deve atingir 300 lux em 50% das horas ocupadas em pelo menos 75% da área em análise.

Paralelamente ao resultado encontrado nas simulações de sDA, foi simulado o ASE, que deve atingir no máximo 10% da área em análise com valores acima de 1000lux em mais do que 250 horas de ocupação anuais.

As simulações de iluminância foram elaboradas com as seguintes características:

- Latitude e longitude do local da obra;
- Supor dias com nebulosidade média (índice de nuvens 50%);
- Período da manhã (10h), ao meio dia (12h) e período da tarde (15h), respectivamente para os solstícios de verão (21 de dezembro) e inverno (21 de junho) e equinócio de primavera (23 de setembro).
- Iluminação artificial desativada;
- Sem a presença de obstrução de elementos opacos: janelas, cortinas, portas internas, considerar abertos;
- Simulação para o grid das áreas de estudo, na altura de 0,75m acima do nível do piso;
- Considerar sombreamentos resultantes de edificações vizinhas, taludes, muros e outros possíveis anteparos.

O software utilizado foi o Rhinoceros com o plugin Honeybee que usa como ferramenta de cálculo Radiance. O modelo geométrico da edificação pode ser visualizado na Figura 1.

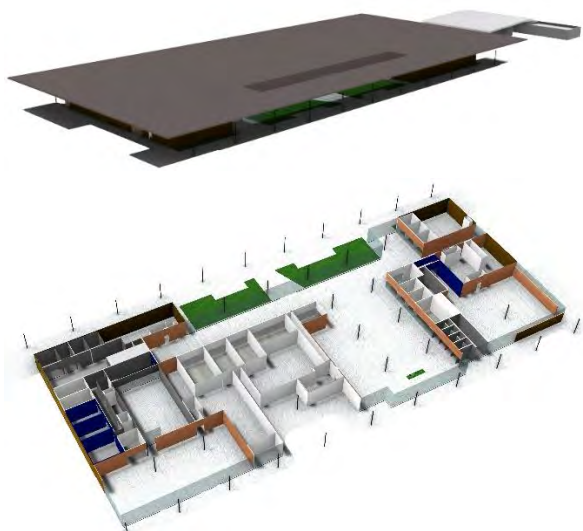


Figura 1: Perspectiva interna do modelo tridimensional utilizado nas simulações de luz natural.

Foram estudados os ambientes internos do Terminal de Passageiros, de acesso público e privado, onde há incidência de luz natural direta (luz provinda do Sol) e difusa (resultado do componente de luz do Sol que é refletido e refratado pela calota celeste/ atmosfera).

### Simulação de desempenho térmico

Para avaliação do desempenho térmico da edificação aeroporto Macaé foi utilizado o método PMV (voto médio previsto). Esse consiste em uma escala numérica que varia

de -3 a +3 e busca reproduzir e qualificar o índice de conforto humano quanto à sensação térmica de frio e calor respectivamente.

Indica-se que os valores de PMV estejam entre +1 (suavemente calor) e -1 (suavemente frio).

Para os cálculos de PMV (conforto térmico) são considerados os fatores de temperatura radiante média (temperatura das superfícies), velocidade do ar (ou do ar insuflado pelo ar-condicionado no ambiente interno), isolamento ocasionado pelas roupas dos usuários, temperatura do ar externa e umidade relativa e atividade praticada pelos usuários no espaço analisado (taxa metabólica).

De forma complementar à análise de conforto, foi calculado o índice PPD. Esse índice é a porcentagem prevista de pessoas insatisfeitas, demonstra a porcentagem de pessoas insatisfeitas em relação ao índice de PMV. A ASRHAE indica que para PMV entre -1 e +1 aceita-se 25% de pessoa insatisfeitas. Ou seja, 75% dos usuários estarão em condições que podem ser consideradas conforto térmico.

Com base nas métricas descritas, a metodologia deste estudo se baseou na análise do PMV por meio de simulação computacional termodinâmica para o Terminal de Passageiros. Para isso, foi elaborado um modelo tridimensional de acordo com o projeto proposto pela arquitetura e foram avaliados cenários de melhoria para a envoltória da edificação. As zonas térmicas foram divididas em zonas perimetrais nas áreas envidraçadas para melhor averiguações dos resultados. Dessa forma, os resultados de PMV são a média ponderada por áreas dos ambientes.

As simulações computacionais foram realizadas com a combinação dos softwares Design Builder (para composição de geometria e aplicação de materiais) e Energy Plus (para os cálculos termodinâmicos). Esse mesmo modelo tridimensional (Figura 2) foi utilizado para desenvolvimento da simulação de eficiência energética. O software Energy Plus permite a determinação do comportamento térmico de edificações sob condições dinâmicas de exposição ao clima.

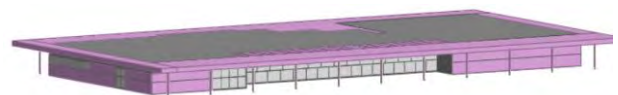


Figura 2: Modelo tridimensional usado nas simulações de desempenho térmico e energético.

Na proposição de materiais construtivos, composições das paredes, cobertura e tipo de vidro foram levadas em considerações o projeto em si e os resultados das simulações acústicas, térmicas e de eficiência energética. Os sistemas construtivos simulados estão dispostos na Tabela 1.

Tabela 1: Sistemas construtivos

Sistema	Composição	Condutância global (U-value)
---------	------------	------------------------------

Parede externa 1	Bloco de concreto 19cm Argamassa 2 cm	2,82 W/m <sup>2</sup> .K
Parede externa 2	Bloco de concreto 19cm Camada de ar R=0,18m <sup>2</sup> .K/W Nexacustic 1,25cm	1,76 W/m <sup>2</sup> .K
Parede externa 3	Bloco de concreto 19cm Argamassa 1cm Cerâmica 1cm	2,83 W/m <sup>2</sup> .K
Parede externa 4	Cerâmica 1cm Argamassa 1cm Placa de gesso 5cm Lã de vidro 10cm Placa de gesso 5cm Argamassa 2cm	0,36 W/m <sup>2</sup> .K
Parede externa 5	Cerâmica 1cm Argamassa 1cm Placa de gesso 5cm Lã de vidro 10cm Placa de gesso 5cm Camada de ar R=0,18m <sup>2</sup> .K/W Nexacustic 1,25cm	0,33 W/m <sup>2</sup> .K
Cobertura	Telha termoacústica Camada de ar Madeira 3cm Forro sonex 3cm	0,32 W/m <sup>2</sup> .K
Vidros	Vidro Laminado 14mm (6mm+8mm) Transmissão Luminosa 24% e 36% Fator Solar 38%	5,40 W/m <sup>2</sup> .K

Os ambientes simulados foram todas as zonas do Terminal de Passageiros, com exceção das áreas técnicas e banheiros. Esses espaços foram separados em zonas periféricas e centrais. As zonas periféricas possuem uma maior incidência de radiação e foram consideradas com profundidade de 4m em relação à fachada. As zonas centrais, por sua vez, foram subdivididas por conta de sua extensão. Ao segmentar esses ambientes, é possível identificar e atuar diretamente em diferentes trechos.

Destaca-se que essas segmentações foram modeladas com divisões virtuais, ou seja, divisões para fins geométricos que não interferem no fluxo de calor entre as zonas.

A carga de ocupação de áreas comuns foi baseada no cálculo de cargas térmicas de climatização. Sendo assim, considerou-se as seguintes ocupações:

- Saguão de embarque = 2,3 m<sup>2</sup>/pessoa;
- Check-in e despacho = 1,3 m<sup>2</sup>/pessoa;
- Inspeção de segurança = 1 m<sup>2</sup>/pessoa;
- Sala de embarque = 1,35 m<sup>2</sup>/pessoa;
- Sala de desembarque = 1,7 m<sup>2</sup>/pessoa;
- Saguão de desembarque = 2,3 m<sup>2</sup>/pessoa.

Para os espaços administrativos com layout disponível, considerou-se a relação entre a quantidade de assentos e a área, sendo:

- Zurich = 5,6 m<sup>2</sup>/pessoa;
- Briefing = 1,3 m<sup>2</sup>/pessoa;
- Lounge VIP = 1,3 m<sup>2</sup>/pessoa;
- COA = 8,2 m<sup>2</sup>/pessoa;

- Refeitório = 2,9 m<sup>2</sup>/pessoa;
- Sala de Reunião = 2,05 m<sup>2</sup>/pessoa.

A carga de equipamentos foi calculada conforme o layout presente no projeto de arquitetura. Considerou-se a seguinte carga para os equipamentos, contidas na norma NBR 16401:

- Computador = 65W
- Geladeira = 690W
- Cafeteira = 1100W
- Televisão / Monitor = 70W
- Micro-ondas = 800W

O setpoint da climatização foi 24°C no primeiro teste e de 25°C no segundo e o horário de ocupação indicado foi de 24 horas. Para o aeroporto, foram consideradas os seguintes valores de taxa metabólica, normatizados pela ASHRAE Standard 55 de acordo com o uso predominante em cada ambiente, distribuídos conforme indicado na Figura 3.



Figura 3: Taxa metabólica adotada para cada ambiente.

O isolamento de roupas compõe um parâmetro importante para o conforto do usuário. No entanto, não há recomendação normatizada para a especificação do vestuário a ser utilizado nas simulações de conforto térmico.

Sendo assim, optou-se pelo cálculo do vestuário base que possivelmente será utilizado pelo usuário com os valores bases retirados da norma ASHRAE Handbook Fundamentals SI Edition.

Neste caso, considerou-se como vestuário básico: roupas íntimas, sapato com meia, camiseta de manga curta e calças jeans. Para os ambientes onde o uso do espaço resulta em taxa metabólica mais baixa, onde os usuários tendem a sentir frio devido à falta de atividade corporal foi especificado que as pessoas também deveriam utilizar um suéter.

Assim, como premissa para análise de conforto térmico, foi considerado como schedule de isolamento de vestimenta uma composição que mescla a presença e a ausência de casaco leve, distribuído nos ambientes de acordo com as respectivas taxas metabólicas de seus usuários, como pode ser visto Figura 4.

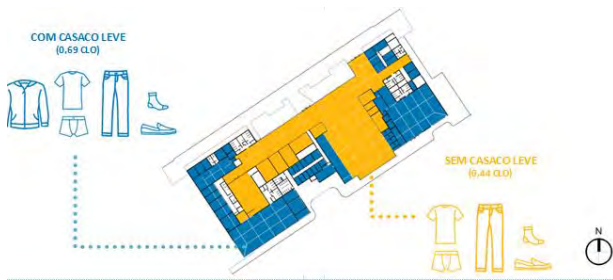


Figura 4: Isolamento de vestimenta por ambiente.

### Simulação de eficiência energética

O procedimento utilizado para realização da simulação de eficiência energética foi o indicado pelo apêndice G da norma ASHRAE 90.1-2010, correspondente ao procedimento adotado para certificação LEED.

Nesse procedimento são simulados dois modelos, um referente ao projeto e as estratégias adotadas em projeto e outro do modelo de referência com base na ASHRAE 90.1-2010.

Os inputs referentes a materiais, número de pessoas, horário de ocupação, setpoint das zonas térmicas, cargas de equipamentos e taxa metabólica são os mesmos utilizados na simulação térmica.

As potências máximas de iluminação interna utilizadas no modelo do edifício de referência foram obtidas através da Tabela 9.6.1 da Norma ASHRAE 90.1-2010, através do método Space by Space. Para o modelo proposto as potências de iluminação foram obtidas do projeto de luminotécnica, somando todas as potências das luminárias em cada espaço da edificação. Os valores de potência utilizada foram:

- Potência do projeto: 32161 W
- Potência do modelo de base: 43702 W

O sistema de iluminação interna também foi simulado com dimerização de zonas perimetrais.

Os modelos de simulação energética usados para calcular o desempenho do edifício proposto foram desenvolvidos considerando uma central de água gelada que utiliza 3 chillers com coeficiente de performance (COP) de 5,23, com uma capacidade de 100 TRs (sendo um reserva), 3 torres de resfriamento (sendo um reserva), 3 bombas primárias (sendo um reserva) e 2 bombas secundárias (sendo um reserva).

Assim, o sistema possui uma linha primária e outra secundária, sendo o sistema de demanda suprido por fan coils. A edificação aproveitará 12 fan coils já existentes, que atenderá as áreas de embarque e desembarque (incluindo saguão e raio-x, e instalará mais 50 novos fancoiletes para suprir as outras áreas. Além disso, o aeroporto possuirá 2 unidades de tratamento de ar, do tipo DOAS, as quais possuem um recuperador de energia do tipo roda entálpica.

Quanto ao modelo de referência, é analisado o sistema a ser simulado, de acordo com a área condicionada do edifício e quantidade de andares. Para este caso em específico, de acordo com o Apêndice G, Tabela G3.1.1A,

da Norma ASHRAE 90.1-2019, o sistema do modelo de referência é o 6 (System 6 - VAV com caixas PFP).

As temperaturas de setpoint usadas na simulação energética são:

- Temperatura de entrada/saída do chiller: 13°C / 7°C
- Temperatura de entrada/saída da torre de resfriamento: 35°C / 29,5°C
- Temperatura de saída dos fan coils: 12,5°C
- Temperatura de setpoint dos ambientes: 24° C +/- 1,11°

Já o sistema de condicionamento de ar no qual é simulado o modelo de base para comparação, corresponde a um sistema de climatização com volume varável (VAV) e alimentado por ventilador paralelo (PFP boxes) (ASHRAE, 2010).

### Classificação climática de Macaé

Macaé apresenta estatisticamente temperaturas médias elevadas, tipicamente acima de 20°C. A umidade relativa do ar média é alta o ano todo, acima de 80%. Os invernos apresentam temperaturas médias na faixa dos 21°C e mínimas em torno dos 16°C, podendo alcançar uma média mínima de 15°C.

De acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, Macaé está em uma região Aw (Clima tropical úmido).

Os dados climáticos anuais considerados para realização das simulações correspondem à cidade de Macaé—RJ. Foi utilizado o arquivo climático TMY (Typical Meteorological Year) do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) Macaé RJ BRA INMET WMO#=868910.

## Resultados

### Iluminação Natural

Os resultados da Exposição Anual da Luz (ASE) vidros externos com transmitância de 36% indicam que 7,5% da área de piso ocupada apresenta níveis acima de 1000lux em mais que 250 horas no ano, como mostra a Figura 5.



Figura 5: Resultados ASE para vidro de TL 36%.

Os resultados da Autonomia Espacial da Luz (sDA) para vidros externos com transmitância de 36% indicam que 27,2% da área de piso ocupada apresenta níveis acima de 300lux acima de 50% das horas do ano, como pode ser visto na Figura 6.

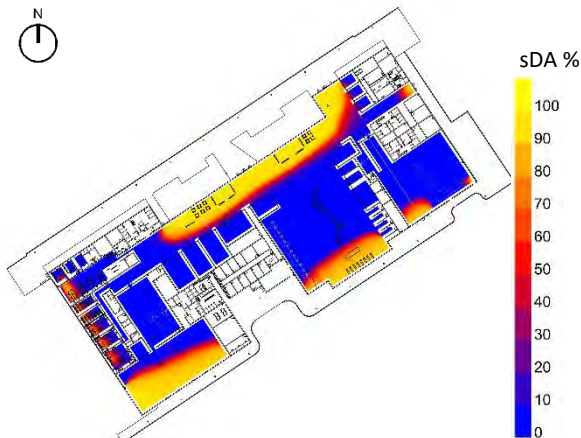


Figura 6: Resultados sDA para vidro de TL 36%.

Na sala de briefing, que possui as cores mais escuras da escala, existia alto risco de ofuscamento por luz direta devido às claraboias. Foi então testado alteração do tamanho de janelas, diminuindo a janela de piso ao teto para janela em fita de h= 1,50m / peitoril 1,20m. O tamanho das marquizes também foi aumentado, tanto para benefícios no conforto visual quanto térmico. A área de projeção de cobertura no modelo inicial era 3794m<sup>2</sup> e no modelo final ficou com 4592m<sup>2</sup>, esse é um aumento de 18% na área de projeção de cobertura.

**Desempenho Térmico**

Considerando uma porcentagem ideal de horas em que 90% dos usuários vão estar confortáveis, há conforto térmico em 100% das horas para a maioria dos ambientes (como no desembarque) e 60% no saguão. No entanto, a área de embarque, o lounge e o refeitório dos funcionários apresentam baixa porcentagem de horas em conforto, que variam de 1% à 50%. Esse resultado é visto na Figura 7



Figura 7: Resultados porcentagem de horas no ano para 90% de usuários satisfeitos.

Em complementar aos mapas de conforto foram feitos os mapas de calor (Figura 8), para demonstrar qual a

sensação que o usuário tem nos ambientes tidos como desconfortáveis. Nestes mapas foram considerados como horas de conforto aquelas com 90% de usuários satisfeitos ou mais. Foram consideradas as premissas de simulação descritas no tópico 3 e, a partir da análise do mapa de calor com setpoint de 24°C, houve o incremento de 1°C na temperatura do ar condicionado nas zonas críticas com desconforto por frio (embarque, lounge e refeitório dos funcionários) de 24°C para 25°C.



Figura 8: mapa de calor — setpoint 25°C.

**Eficiência Energética**

Os cenários estudados na análise preliminar envolveram ajustes de tipos de vidros, iluminação e ar-condicionado, sendo suas estratégias, respectivamente: diminuição do fator solar dos vidros, dimerização de zonas perimetrais e automação dos dampers da unidade de tratamento de ar. Também ocorreu a análise para uma opção alternativa de central de água gelada (CAG), para cenários com as mesmas medidas de eficiência energética. Nesse cenário o projeto obteve eficiência de 4%.

Com os resultados da análise preliminar, decidiu-se na adoção da central de água gelada de alta eficiência e na seleção de vidro com baixo fator solar e boa transmissão luminosa. Com o sistema apresentado, o consumo energético do projeto foi 4% menor que o modelo de base (Figura 9).

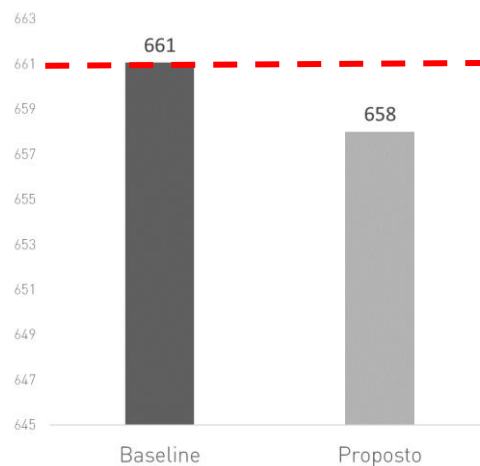


Figura 9: Consumo anual de energia elétrica (MWh).



## Discussão dos resultados

As diferentes análises realizadas no projeto do Aeroporto Macaé puderam nortear algumas alterações arquitetônicas e de sistemas que proporcionaram resultado para uma edificação com qualidade ambiental e eficiência. As principais foram: Aumento da área de marquises, seleção da espessura e propriedades térmicas do vidro, diminuição de área de vidros no ambiente Briefing, setpoint de 25°C para os ambientes, composição da cobertura e de algumas paredes externas mais propensas a ganhos de calor.

Destaca-se a importância da taxa metabólica e do vestuário do usuário para o cálculo do conforto térmico: em ambientes que demandam menor atividade, os usuários tendem a sentir certo desconforto por frio quando o sistema opera na manutenção do setpoint de temperatura. Essas análises estão em acordo com apontados em outros estudos como Ruviaro et al. (2019) e Antonelli (2012).

Os vidros selecionados também contribuíram para a redução de carga térmica da edificação. Pela comparação de custos de tarifação energética entre o projeto e o modelo de referência o projeto possui um custo 1% menor, o que representa que o aeroporto de Macaé possui um desempenho energético superior a um modelo que possui boas características de projeto, segundo a norma. Assim, o projeto atual está dentro do mínimo necessário que a norma determina.

Considerando a análise preliminar, com utilização de dampers automatizados por sensores de CO<sub>2</sub> nas áreas técnicas de HVAC, para renovação de ar do saguão, embarque e desembarque, o resultado foi de 4% de redução no consumo energético alcançados pelo sistema de ar-condicionado, algo significativo para o baixo valor de investimento. Além dos ganhos econômicos, o controle dos níveis de CO<sub>2</sub> aprimoraria a qualidade do ar interior nos ambientes atendidos.

Já o resultado da simulação de autonomia espacial da luz indica que as áreas de entrada, saguão de desembarque, praça de alimentação, sala de embarque e saguão de desembarque atingem um mínimo de 300 lux em pelo menos 50% das horas de ocupação anuais. Incluem-se também os ambientes com caixilho em fita na fachada sudoeste, que correspondem aos lounges VIP, as salas de briefing, a sala Zurich/ ASEB e a sala de reunião.

Estes ambientes apresentaram o melhor aproveitamento de luz natural para as duas situações de vidro estudadas, entretanto, o vidro de transmissão luminosa de 36% permite um aumento de 10% no aproveitamento de luz natural durante o ano.

O resultado da simulação de exposição anual da luz indica que as áreas de entrada, saguão de desembarque e praça de alimentação apresentam possibilidade de ofuscamento e superaquecimento para as duas opções de vidro analisadas, com transmitância luminosa de 24% e 36%.

## Conclusão

As simulações realizadas para o projeto do Aeroporto Macaé permitiram ao time de projetistas fazerem escolhas mais conscientes de adequações tanto na arquitetura quanto nos sistemas da edificação.

A composição dos sistemas construtivos, aliado a equipamentos de elevada eficiência, permitiu economia energética e redução aumento do conforto lumínico e térmico na edificação.

Em conclusão, a fusão da experiência do arquiteto e simulações de computador como uma ferramenta de projeto levou a um cenário de projeto otimizado. As simulações de computador foram fundamentais para alcançar um design adequado; em toda a economia de energia e qualidade ambiental interna devido à luz do dia.

## Referências

- American Society Of Heating, Refrigerating And Air-Conditioning Engineers. ASHRAE 55 Handbook – Fundamentals. Atlanta, 2020.
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers (ASHRAE). (2010) Standard 90.1: Energy Standard for building Except Low-Rise residential Buildings, Atlanta.
- ANTONELLI, B. A. Verificação da adequabilidade do modelo normalizado de conforto térmico utilizando a taxa metabólica determinada pelas sensações térmicas reais de usuários de ambientes industriais. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) Universidade Federal Tecnológica do Paraná, Ponta Grossa.
- RUPP, R. F.; GHISI, E. Potencial de economia de energia elétrica através do uso da luz natural e da ventilação híbrida em edifícios comerciais em Florianópolis. Ambiente Construído, v. 13, n. 4, p. 75-86, 2013a.
- RUPP, R. F.; GHISI, E. Potencial de economia de energia elétrica em edificações comerciais híbridas localizadas em Florianópolis, SC. Ambiente Construído, v. 13, n. 1, p. 143-160, 2013b.
- RUVIARO, R. S. ; ZAMBONATO, B.; GRIGOLETTI, G. de C. Extensão do PMV para avaliação do conforto térmico de idosos em ambientes com ventilação natural. PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção, Campinas, SP, v. 12, n. 00, p. e021002, 2021. DOI: 10.20396/parc.v12i00.8658443.

## Os Efeitos Não Visuais da Luz e o Desempenho de Edifícios Habitacionais

Amanda Camuzato de Quadros<sup>1</sup>, Raphaela Walger da Fonseca<sup>1</sup>, Fernando Oscar Ruttkay Pereira<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratório de Conforto Ambiental, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil

### Resumo

A descoberta de células da retina associadas ao funcionamento do ritmo circadiano, conforme o padrão de luz recebido, demandou estudos acerca dos efeitos da iluminação na saúde. Tais células operam independentemente da visão, requerendo a revisão dos critérios do projeto de iluminação. Este trabalho investigou o efeito da dimensão dos ambientes e refletâncias superficiais no desempenho da iluminação circadiana. Simularam-se múltiplos cenários no programa ALFA, obtendo-se o comparativo entre a iluminação visual e não visual. Concluiu-se que a revisão dos parâmetros projetuais é essencial, visto que características que atendem ao primeiro aspecto, podem atender ou não ao segundo, ou vice-versa.

### Introdução

As pesquisas acerca do tema se destacaram a partir das descobertas de dois grupos médicos, onde o primeiro, composto por David Berson, Felice Dunn e Motoharu Takao (Berson; Dunn; Takao, 2002), estabeleceu a conexão necessária para retratar e compreender esse mecanismo dos efeitos biológicos que são controlados pelo ciclo claro e escuro, identificando um terceiro tipo de fotorreceptor na retina dos mamíferos, as “células ganglionares da retina intrinsecamente fotossensíveis” (ipRGC), que os torna sensíveis a luz. Já o segundo grupo é composto pelos médicos Jeffrey C. Hall, Michael Rosbash e Michael W. Young, que constataram a existência de mecanismos moleculares que controlam o ritmo circadiano, e por este motivo receberam o Prêmio Nobel de Medicina de 2017 (The Nobel Prize, 2017).

O ritmo circadiano consiste em variação nas funções biológicas, que se dão conforme alternância de claridade(dia) e escuridão(noite), e cada ciclo dura cerca de 24 horas. Podendo vir a gerar impactos no fisiológico e psicológico humanos, a disfunção deste ritmo está correlacionada ao desenvolvimento de comorbidades (Reppert; Weaver, 2002). O retorno financeiro também se mostra um motivador para a busca da elaboração de ambientes iluminados naturalmente, já que, além da economia de energia, tem relação com o aumento da produtividade por parte dos usuários. Vistas do exterior tem o potencial de aumentar o rendimento no trabalho e o bem estar dos colaboradores de diversas maneiras, tal

como a ausência de padrões de luz natural acarretam problemas como desorientação e de influência na função cognitiva (Farley; Veitch, 2001). A luz natural produz no organismo o hormônio adrenocorticotrófico (ACTH) e esteroides, que são consideradas estressantes, mas, diferindo da luz artificial, a natural produz também os elementos que neutralizam essas substâncias e equilibram o corpo (Martau, 2009).

Logo, as pesquisas voltadas à iluminação tomaram novos caminhos, nos quais a luz não é apontada somente enquanto um elemento principal que proporciona a visão e a percepção visual, mas também um importante recurso para a regulação do sistema circadiano. No contexto arquitetônico e da construção civil, muitos dos estudos e pesquisas em relação a iluminação natural se estabeleceram com enfoque nas condições de conforto visual, buscando impedir a ocorrência de ofuscamento e obter a iluminância adequada, deixando de lado, múltiplas vezes, os seus efeitos não visuais. Atualmente, é possível observar a busca de conhecimento a respeito das influências não visuais da iluminação natural, e seu impacto no funcionamento e saúde humanos. Diante da descoberta das células ganglionares da retina, que tem apenas 20 anos, estudos referentes à relação entre iluminação e o sistema circadiano humano são incipientes (Martau, 2009).

No quesito iluminação natural e a sua interferência no ciclo circadiano, é necessário que o modo de projeção do luminotécnico seja reavaliado na prática arquitetônica, já que a evidenciação dos impactos da iluminação na saúde do ser humano aumentaram a responsabilidade dos profissionais capacitados para esta função (Chaves; Martau, 2019). Esta pesquisa consiste em um estudo de caso para compreender como elementos arquitetônicos influenciam na qualidade do ambiente luminoso, e baseia-se em uma das tipologias arquitetônicas que deram origem aos ábacos do método simplificado, proposto para a nova versão da norma ABNT 15.575 - Desempenho de edificações habitacionais, tópico:Desempenho lumínico (ABNT, 2021). As tipologias dos ábacos foram adotadas nas simulações computacionais por serem definidas em um contexto de regulação e terem um desempenho visual conhecido. Propõe ainda, uma análise da equivalência do desempenho mínimo da iluminação natural de edificações estabelecido conforme a proposta da norma, com o desempenho mínimo para o bem estar do usuário. E, por

fim, busca fornecer indicativos e contribuir para a determinação de futuras diretrizes referentes aos efeitos não visuais da luz.

Dentre as duas métricas em desenvolvimento que se destacam, Lux Melanópico Equivalente (LME) (International Well Building Institute, 2019; LUCAS et al., 2014) e o Estímulo Circadiano (REA; FIGUEIRO, 2018), a aplicação mais notável do Lux Melanópico Equivalente é a da certificação para edificações WELL Building Certification (Chaves; Martau, 2019). Na certificação, a métrica e a sensibilidade espectral do ipRGC [Função de Resposta Melanopsina -  $Nz(\lambda)$ ] foram adaptadas para serem empregadas em projetos arquitetônicos. As recomendações estabelecidas para a iluminação circadiana indica que valores mínimos de LME devem ser alcançados entre os horários das 9h e 13h, sendo diminuídos após as 20h. A medição da iluminância (lux) deve ser realizada no plano vertical ao nível do olho do ocupante, simulando a chegada da luz, e para isso são indicadas as seguintes alturas: onde houver estações de trabalho o nível mínimo deve ser alcançado a 0,45m acima da superfície de trabalho e em situações que não incluam as estações, a altura conveniente seria de aproximadamente 1,40m acima da superfície do piso.

## Metodologia

O método abordado divide-se em três etapas, a primeira consiste em avaliar o potencial circadiano das tipologias arquitetônicas que deram origem aos ábacos do método simplificado na proposta de revisão do tópico de desempenho lumínico da norma (ABNT, 2021), e compreender a influência ocasionada pela variação arquitetônica. A segunda buscou relacionar o nível mínimo de desempenho para suficiência de luz, adotado pela norma, com medidas de desempenho do potencial circadiano da edificação. Por fim, verificar o impacto de critérios arquitetônicos no ritmo circadiano e comparar o que significa para o quesito visual, gerando uma referência para o não visual.

Por haver a possibilidade de utilizar a, até então, única ferramenta capaz de prever o lux melanópico equivalente (LME) por meio de simulações precisas e de alta resolução espectral, o programa ALFA, a métrica utilizada foi a de Lux Melanópico Equivalente. O funcionamento da ferramenta denominada ALFA (Adaptive Lighting for Alertness) se dá através de uma interface de usuário aprimorada incorporada ao ecossistema Rhinoceros 3D, se caracterizando enquanto um plug-in. Para superar a limitação do sistema não visual ser sensível a comprimentos de onda específicos da luz azul, fazendo com que sua atividade não possa ser descrita pelos canais tradicionais de cores Vermelho/Verde/Azul, o ALFA estendeu o mecanismo de iluminação Radiance, um sistema de software de rastreamento de raios altamente preciso para computadores, para renderizar o mundo em espectros de 81 cores de alta resolução (Solemna, 2022). O traçado destes raios espectrais viabiliza que o ALFA preveja a quantidade de luz absorvida pelos fotorreceptores não visuais do observador, conforme sua localização e direção de visão.

Como estes receptores absorvem a luz utilizando o pigmento melanopsina, o programa oportuniza a previsão rápida de Lux Melanópico Equivalente (LME) para diversas posições de visualização em qualquer ambiente de iluminação.

O ALFA adota o estado de alerta quando a Razão M/P (quantificação do efeito da luz no ritmo circadiano) é maior do que 0,9, e o estado de relaxamento quando M/P for menor que 0,35. Já entre 0,35 e 0,9 se estabeleceu o estado neutro. A Razão M/P é uma métrica espectral que passou a ser utilizada para avaliar as consequências da luz no impacto da saúde, relacionando o bem-estar e estados de relaxamento, sono ou alerta (Miller; Irvin 2019).

## Parâmetros adotados nas simulações

Através de uma análise dentro da base de dados simulados que originou os ábacos do método simplificado da proposta de revisão da norma ABNT-NBR 15.575 (ABNT, 2021), dentro o zoneamento geográfico em foco, escolheu-se a linha do ábaco a ser utilizada como comparativo e que, portando, estipula os critérios para a modulação dos ambientes para as simulações no ALFA. O zoneamento geográfico estabelecido na base de dados consiste nas três faixas de latitude que dividem o território nacional, e a faixa determinada para estas simulações foi a terceira. A cidade selecionada para as simulações foi Curitiba.

Além da escolha da zona, deu-se preferência para ambientes sem sacadas ou marquises, e com transmissão visível do vidro maior que 75%. A limitação da quantidade de combinações paramétricas, como o pé-direito e a altura da verga da janela foram fixados, partindo do fato de que as tipologias residenciais apresentam pouca variação desses elementos (PEREIRA, Fernando O. R. et al., 2020). As aberturas foram alocadas direcionadas para o Norte. Assim como para a realização do ábaco, a área da abertura foi definida enquanto 1/6 da área do piso e a altura da verga da janela à 2,10m do piso. Características dos ambientes na Tabela 01:

Tabela 01: Características aplicadas aos ambientes.

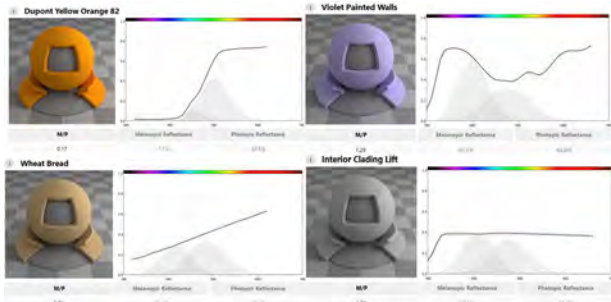
AMBIENTE	LARGURA (m)	PROFUNDIDADE (m)	ÍNDICE P	ÁREA DO PISO (m <sup>2</sup> )	Janela (1/6 Apiso) (m <sup>2</sup> )	DIMENSÃO JANELA LxH (m)
01	2,26	2,26	1,00	5,11	0,851	1,00 x 0,85
		3,39	0,67	7,66	1,277	1,00 x 1,30
		4,52	0,50	10,22	1,703	1,00 x 1,70
		5,65	0,40	12,77	2,128	1,30 x 1,70
		2,50	1,00	6,25	1,04	1,00 x 1,10
02	2,50	3,75	0,67	9,38	1,563	1,00 x 1,60
		5,00	0,50	12,50	2,083	1,30 x 1,60
		6,25	0,40	15,63	2,604	1,60 x 1,70
		3,00	1,00	9,00	1,50	1,00 x 1,50
		4,50	0,67	13,50	2,25	1,40 x 1,70
03	3,00	6,00	0,50	18,00	3,00	1,70 x 1,80
		7,50	0,40	22,50	3,75	2,00 x 1,90

Para indicar os ambientes conforme sua dimensão nas etapas posteriores, adotou-se numerações em que a primeira parte se refere a largura, sendo o número 01 definido por uma largura igual a 2,26m, assim como o 02 se refere à largura de 2,5m e 03 aos ambientes de largura igual a 3,0m. A numeração a seguir pode variar entre 1, 2, 3 ou 4, por exemplo: 01\_1, e está se refere à profundidade do ambiente.

As variações arquitetônicas e naturais estipuladas para análise foram: as estações, priorizando o inverno e o verão; o tipo de céu, limitado ao claro e nublado; período do dia, sendo divididos em manhã, no horário das 9h, e tarde, às 15h; direção de visão do observador; variação de área e paredes de materiais com diferentes cores. A medição da iluminância (lux) foi realizada no plano vertical, ao nível do olho do ocupante com as alturas para as estações de trabalho a 0,75m da superfície do piso e dos planos de visão à 1,20m.

Na base de dados do ALFA foram elencados quatro materiais de diferentes cores, mesma refletância fotópica e diferentes refletâncias melanópicas, para a realização de uma análise comparativa. Na figura 01 é possível observar os 4 diferentes materiais, com refletâncias em 40%, e seus valores de razão M/P (métrica espectral utilizada para avaliar as consequências da luz no impacto da saúde) e de refletância melanópica.

Figura 01: Características dos quatro diferentes materiais selecionados



Por apresentar uma Razão M/P igual à 1,00, o material adotado para as paredes na realização das simulações com quase todas as variantes, exceto a de cor, foi o “Interior Cladding Lift”, simulando a cor e materialidade do revestimento interno da parede, na etapa de argamassa.

**Resultados e discussão**

De modo geral, é possível observar um comportamento semelhante nos ambientes de diferentes larguras, sendo eles: o ambiente 01, com 2,26m, o 02, com 2,5m e o 03 com 3,0m de largura. Veja os gráficos que apresentam as médias de iluminância melanópica e fotópica nas diferentes profundidades e larguras:

Gráfico 01: Ambiente 01



Gráfico 02: Ambiente 02

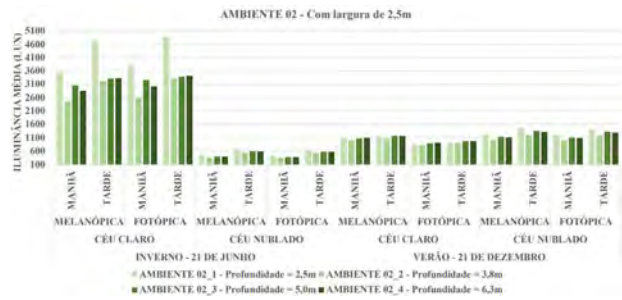
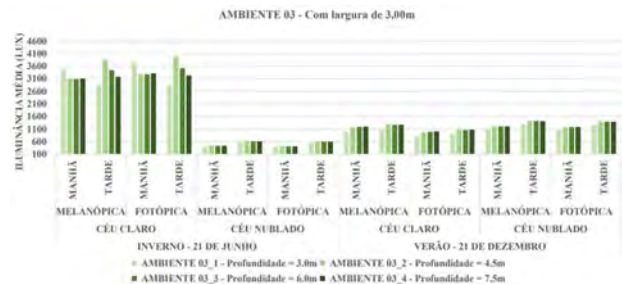


Gráfico 03: Ambiente 03

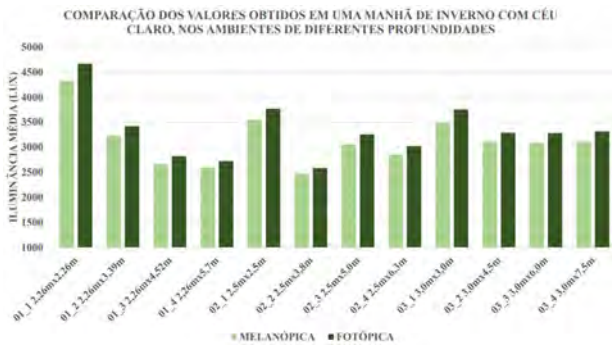


De modo geral, em relação à mudança de céu, entre claro e nublado, os gráficos apresentam pouca diferença, tanto nos valores de iluminância melanópica, como nos de iluminância fotópica. O comportamento similar entre os gráficos é notório, os valores obtidos com o céu claro no inverno se destacam, sendo os mais elevados em todos os ambientes de diferentes dimensões. Tais resultados podem ser justificados pela orientação das aberturas, à Norte, demonstrando a influência da inclinação da trajetória solar nesta estação. Nesta mesma estação e condição de céu, pode-se perceber que é onde há mais variações entre as diferentes profundidades, mas, como em todos os casos, os valores da iluminância melanópica e fotópica apresentam variações proporcionais entre si, conforme o período do dia. Além de proporcionais, há uma proximidade entre as iluminâncias, comportamento que condiz com a propriedade do material das paredes.

**Variação de área: Relação com a profundidade**

Observando a relação da profundidade dos ambientes, se limitando aos valores obtidos na manhã de inverno com céu claro, é possível reparar que o ambiente de menor área apresentou médias mais elevadas e que há uma tendência de diminuição nestes valores conforme o aumento da profundidade, que se difere nos ambientes com aberturas maiores.

Gráfico 04: Ambientes de diferentes dimensões



No Gráfico 04 é representado tanto a relação entre as iluminâncias melanópicas e fotópicas, que segue em paridade em todas as diferentes dimensões, sendo mais elevada a média de iluminância fotópica, quanto o comportamento dos ambientes de mesma largura com diferentes profundidades. Nos ambientes de largura igual à 2,26m as médias de iluminância fotópica e melanópica diminuiram conforme o aumento da profundidade, o que pode ser explicado pelo alcance da luz direta, que adentra pela abertura, no interior do ambiente. Nos ambientes de numeração 02 o comportamento difere, quebrando a linearidade entre as profundidades, o ambiente de dimensão 2,5m x 3,8m apresenta valores menores do que o ambiente seguinte, de maior profundidade. Já nos últimos ambientes, de profundidade igual à 3,0m, o de menor profundidade se sobressai nas médias apresentadas, seguido pelos demais que apresentam pouca variação entre si, nos quais a dispersão de luz natural no ambiente se dá de maneira mais uniforme, dado ao fato da ampliação das áreas das aberturas, consequência do aumento de área do piso.

Para avaliar os valores apresentados, decidiu-se elencar apenas os ambientes 01\_1 de dimensão 2,26m x 2,26m e 01\_4 de 2,26m x 5,7m, conforme a direção do sensor, na segunda coluna dos pontos de leitura, para abertura ou para os fundos do ambiente. Observe as figuras e gráficos a seguir:

Figura 02: Vista superior do ambiente

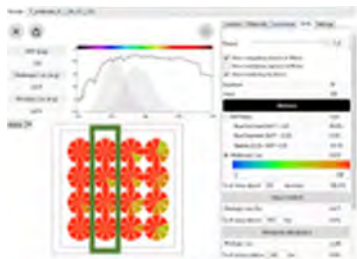


Gráfico 05: Razão M/P obtida nos quatro diferentes pontos de medição



Neste caso pode-se notar uma variação nas razões entre 0,9 e 1,15, quanto maior a iluminância melanópica em relação à fotópica, maior será a razão. Partindo disso, o gráfico representa valores maiores nos sensores direcionados à abertura, do que para os direcionados aos fundos do ambiente, assim como nos pontos mais próximos da abertura. No gráfico 06 encontram-se os valores de iluminância melanópica e fotópica obtidas nas direções da abertura e fundos, nos pontos de medição alocados na segunda coluna.

Gráfico 06: Valores apresentados em uma das colunas centrais de medição.



Como essas relações se estabelecem no ambiente 01 de maior profundidade, o 01\_4:

Figura 03: Vista superior do ambiente

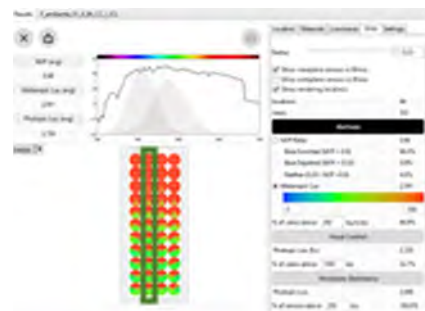
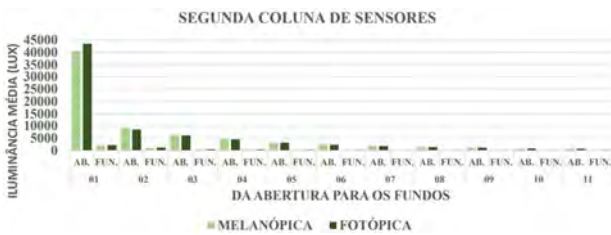


Gráfico 07: Razão M/P obtida nos quatro diferentes pontos



Já, neste ambiente, a variação das razões fica entre 0,9 e 1,10. A linha de tendência da razão dos pontos direcionados aos fundos do ambiente indica um crescimento conforme mais distante da abertura, enquanto que, os valores dos sensores voltados à abertura decrescem. Atente para maiores informações acerca dos valores obtidos a cada ponto desta segunda coluna de sensores, abaixo:

Gráfico 08: Valores apresentados em uma das colunas centrais de medição

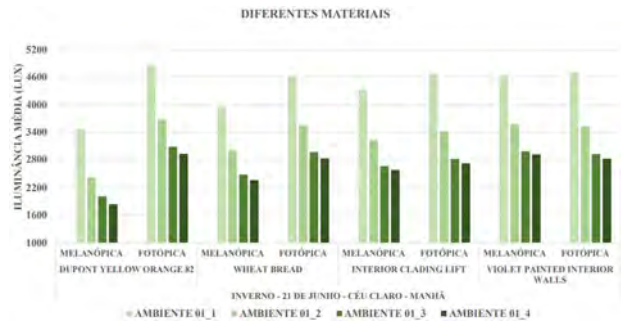


No gráfico 08 nota-se, de início, a diferença discrepante nos valores de iluminância fotópica e melanópica no primeiro ponto de medição, voltado à abertura, fator que pode ser compreendido pela proximidade do ponto com o externo. Neste mesmo ponto os valores diminuem abruptamente, quando o sensor se volta aos fundos do ambiente. Nos pontos seguintes, os valores obtidos nos sensores voltados a abertura decrescem linearmente, assim como os valores nos sensores direcionados aos fundos, com os quais passam a diferir cada vez menos, conforme mais profundo o ponto se localiza no ambiente. Pode-se concluir que, em ambos os ambientes, de mesmo material, ambas as iluminâncias correspondem de maneira semelhante à diferença de profundidade.

**Variação de material: Relação com a cor e sua refletância**

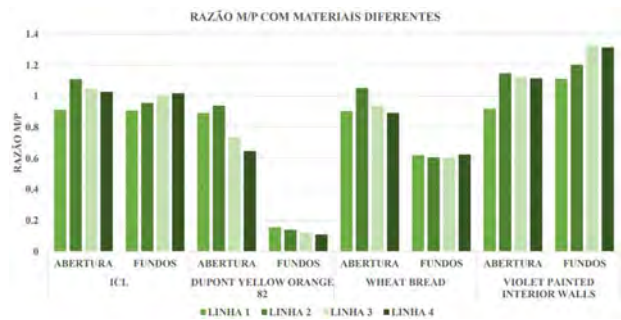
Nesta análise foram limitadas as variantes nas simulações, utilizando apenas os ambientes de largura igual à 2,26m, durante o inverno, com céu claro no período da manhã, variando apenas as profundidades e materiais. A representação dos valores obtidos encontra-se no gráfico 09:

Gráfico 09: Valores dos diferentes materiais



O comportamento semelhante na variação dos valores conforme a profundidade, de diminuir, tanto as médias de iluminância fotópica quanto melanópica, se apresenta em todos os materiais simulados. Com exceção do “Violet Painted Interior Walls”, de cor violeta, os valores de iluminância melanópica se mostram inferiores aos de iluminância fotópica, decrescente conforme o aumento da profundidade. Vale destacar que o material que apresenta maior diferença entre a média melanópica e fotópica é o laranja vibrante, nomeado “Dupont Yellow Orange 82”. Selecionando apenas os valores de uma das colunas centrais de sensores, a segunda, do ambiente 01\_1, durante uma manhã de inverno, com céu claro, obteve-se a representação do gráfico 10.

Gráfico 10: Razão M/P nos diferentes materiais



No gráfico 10 é possível observar, nas barras de diferentes tons de verde, as razões M/P obtidas nos pontos de sensores localizados na segunda coluna, em cada uma das quatro linhas da grade. Este permitiu notar a dissonância das Razões dos sensores direcionados à abertura e aos fundos, obtidas no ambiente com o material “Dupont Yellow Orange 82”. Tal relação se estabelece por conta das propriedades do material, em que apresenta uma porcentagem de refletância melanópica muito inferior à refletância fotópica, o que acarreta em um aumento de iluminância fotópica no interior do ambiente. Atendendo aos valores de razão estados de alerta, relaxamento ou neutro, pode-se afirmar que boa parte do ambiente com o material na cor laranja vibrante proporciona o estado de alerta, pela porcentagem inferior de refletância melanópica característica do material. Em boa parte dos demais ambientes a Razão M/P é maior do que 0,9, classificada enquanto estado alerta.

As simulações realizadas e as análises estabelecidas viabilizaram uma maior compreensão acerca da influência da iluminação natural e a respeito das características construtivas que podem interferir diretamente neste impacto. Nos valores para provisão de luz natural adotados no ábaco proposto para a norma, focando na coluna que se refere ao ângulo de obstrução externa de 0° a 20°, os ambientes 01, 02 e 03 apresentam uma Fração Alvo de autonomia da luz natural espacial classificada como superior ou igual à 70%, com exceção dos ambientes mais profundos, em que o valor se classifica enquanto intermediário, tendo a Fração Alvo maior ou igual a 55%. Logo, estes ambientes ultrapassam o nível mínimo de desempenho para suficiência de luz, adotado pela norma. Pode-se afirmar que todos os ambientes com as paredes nos materiais “Interior Cladding Lift” e “Violet Painted Interior Walls” proporcionaram ao usuário condições para a manutenção do estado de alerta, com uma Razão M/P média superior à 0,9. Enquanto que os ambientes com o material “Wheat Bread” proporcionaram o estado neutro, assim como os de menor profundidade com paredes com o “Dupont Yellow Orange 82”, sendo que os mais profundos chegaram a Razões M/P inferiores a 0,35, configurando o ambiente de relaxamento. As médias de iluminância fotópica e melanópica diminuíram conforme o aumento da profundidade, o que pode ser explicado pelo alcance da luz direta, que adentra pela abertura, no interior do ambiente.

## Conclusões

Conclui-se que, para as influências não visuais pode haver mudança no estímulo de alerta, por mais que o ambiente se encontre em conforto visual. O que a norma hoje, focada em suficiência de luz, estabelece como atendendo ao desempenho mínimo, dependendo do acabamento das superfícies, pode ou não proporcionar estado de alerta aos usuários. O projeto que considera a iluminação circadiana, como os resultados da variação das cores das superfícies mostraram, deve selecionar o acabamento das superfícies internas conforme o estado desejável para a atividade a ser desenvolvida no ambiente. As edificações precisam fornecer as necessidades básicas e hormonais humanas, considerando que a posição e direção afeta a iluminância melanópica. A influência da mudança de direção de visão e localização do usuário indica a potencialidade de um leiaute interno pensado a partir destas informações. A mudança entre céu claro e nublado não é significativamente relevante, diferentemente da variação de estação, que altera a inclinação solar.

## Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15.575 – Desempenho de edificações habitacionais. Rio de Janeiro, 2021.
- BERSON, David M; DUNN, Felice A; TAKAO, Motoharu. Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock. *Science*, 2002. doi: 10.1126/science.1067262.
- CHAVES, Nathali Pimentel; MARTAU, Betina Tschiedel. Repensando o Projeto de Iluminação: avaliação de métricas de luz circadiana. VI Simpósio Brasileiro de Qualidade do Projeto no Ambiente Construído, 2019. DOI:10.14393/sbqp19050.
- FARLEY, K.M.J.; VEITCH, J.A. A Room with a View: A Review of the Effects of Windows on Work and Well-Being. Canada, 2001. DOI: 10.4224/20378971.
- FLOYD. Radiance: Synthetic Imaging System, 2022. Disponível em: <https://floyd.lbl.gov/radiance/HOME.html>. Acesso em: 25 de fevereiro de 2022.
- LIBRADTRAN. 2020. Disponível em: [www.libradtran.org/doku.php](http://www.libradtran.org/doku.php). Acesso em: 25 de fevereiro de 2022.
- LUCAS, R. J. et al. Measuring and using light in the melanopsin age. *Trends in Neurosciences*, [s. l.], v. 37, n. 1, p. 1–9, 2014.
- MARTAU, Betina Tschiedel. A luz além da visão: iluminação e sua influência na saúde e bem-estar. *LUME Arquitetura*, São Paulo, ed. 38, p. 62-68, jun./jul. 2009. Disponível em: <https://www.lumearquitetura.com.br/lume/default.aspx?c=1754>. Acesso em: 20 março de 2022.
- MILLER, N.J.; IRVIN, A.L. M/P ratios – Can we agree on how to calculate them? IES: Illuminating Engineering Society, [S.I.], 2019. Disponível em: <https://bit.ly/2RmXqIF>. Acesso em: 15 de julho de 2022.
- PEREIRA, Fernando O. R.; FONSECA, Raphaela W.; GIRALDO, Natália V.; SCALCO, Veridiana A.; MARIANO, Pedro O. P.; QUEIROZ, Natália; ROSA, Franciele F. Ferramenta simplificada para a estimativa do desempenho da iluminação natural em edificações residenciais. ENTAC2020 – Porto Alegre, Brasil, 2020.
- REA, M. S.; FIGUEIRO, M. G. Light as a circadian stimulus for architectural lighting. *Lighting Research & Technology*, [s. l.], v. 50, n. 4, p. 497–510, 2018.
- REPERT, Steven; WEAVER, David. Coordination of circadian timing in mammals. *Nature*. 2002. DOI: 10.1038/nature00965
- RHINOCEROS. Features. 2022. Disponível em: <https://www.rhino3d.com/features/>. Acesso em: 20 de março de 2022.
- SOLEMMMA. ALFA video, 2022. Disponível em: <https://www.solemma.com/alfa/#ALFAvideo>. Acesso em: 18 de novembro de 2022.
- THE NOBEL PRIZE. Press Release. Disponível em: <https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/2017/press-release/>. Acesso em: 20 de fevereiro de 2022.

## THE NEW CALCULATION METHOD OF $t_{cl}$ (CLOTHING SURFACE TEMPERATURE) IN THERMAL COMFORT

Anneli Maricielo Cárdenas Celis<sup>1</sup>, José Walter Cárdenas Sotil<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Professor, Department of Architecture, Federal University of Amapá, Macapá, Brazil

<sup>2</sup> Professor, Department of Computer Science, Federal University of Amapá, Macapá, Brazil

### Abstract

TCL (clothing surface temperature) is modeled by a non-linear implicit equation and needs to be calculated correctly to minimize heat exchange inaccuracies in the calculation of the PVM (Prediction mean vote), the thermal comfort index that translates human sensitivity to cold and heat. Depending on the value of  $h_c$  (convection coefficient between air and clothing) the  $t_{cl}$  equation results in a polynomial of degree 4 from which the exact value of the only real positive root is obtained, or in a power function which is transformed into a polynomial of degree 16, whose exact solution is still unknown, however it is only applied for very small values of air velocity. The use of the exact solution of the polynomial of degree 4 avoids the propagation of rounding errors, the equation considers the clothing surface temperature and verified with PMV (prediction mean vote) for a suitable choice of initial temperature.

### Introduction

According to Moreno (2006), the PMV method, or thermal balance model, consists of assessing thermal comfort from numerical values that seeks to understand human sensitivity to cold or heat by analyzing environmental variables (temperature, relative humidity, and air speed) and personal variables (metabolism and thermal resistance of clothing).

The PMV method was developed by Fanger in 1970, one of the pioneers in studies of thermal comfort, in which it relates the difference between the heat produced and the heat released by the human body by means of an estimated average vote evaluation panel based on the ASHRAE scale. The scale classifies the thermal sensation varying between values from + 3 to - 3, where positive values indicate the sensation of heat and negative values indicate the sensation of cold according to ISO 7730 (2005).

For ASHRAE 55 (2013) it is important that the greatest number of people can feel satisfied with the environment. However, due to the biological conditions of each person, it would be impossible for everyone to be in thermal comfort, and there will always be a percentage of dissatisfied people, according to Broday, Xavier and Oliveira (2017).

Santos (2018), states that the Fanger model was widely disseminated in the scientific community, indicating that the main positive aspect is related to its flexibility regarding the inclusion of human and environmental variables, which are capable of interfering with the feeling of comfort, making its characterization more compatible with reality.

Oliveira (2008), comments that despite all the advantages expressed by the Fanger method, a factor not yet fully known is the  $t_{cl}$ , which represents the outside temperature of the clothing. Thus, from the equation of an interactive method in which represents the heat balance between the body it is possible to know its value.

The calculation is performed by the heat flow transmitted by conduction through the clothing, Oliveira [6] mentions that it starts from the inner layer, the skin temperature, to the outer layer, which is equivalent to the sum of the heat exchanges by convection and radiation to the surrounding environment, in a permanent regime.

To calculate the exact solution of  $t_{cl}$  we write the polynomial of degree 4 associated with the model as a product of two quadratic polynomials, as described by Shmakov (2011), from which we obtain as an intermediate step a cubic equation described in Filho and Pereira (2019). The process for calculating the exact solution is detailed in the Methods section.

### Methods

The model of the clothing temperature  $t_{cl}$  according to Santos [5] is modelled by the equation given in implicit form:

$$t_{cl} = 35.7 - 0.028M - 0.155I_{cl}[3.96 \cdot 10^{-8}f_{cl}((t_{cl} + 273.15)^4 - (t_{rm} + 273.15)^4) + f_{cl}h_c(t_{cl} - t_a)] \quad (1)$$

where,  $t_{cl}$  is the clothing surface temperature (°C),  $M$  is the metabolic rate, organic heat production (met ou W/m<sup>2</sup>),  $I_{cl}$  is the clothing thermal insulation (Clo),  $t_a$  is the air temperature or dry bulb temperature (°C),  $f_{cl}$  is the clothing area factor (adimensional), is calculated as a function of the value of  $I_{cl}$ :

$$f_{cl} = \begin{cases} 1 + 0,2 \cdot I_{cl}, & I_{cl} \leq 0,5 \\ 1,05 + 0,1 \cdot I_{cl}, & I_{cl} > 0,5 \end{cases} \quad (2)$$



$v_{ar}$  is the relative air speed, given by,

$$v_{ar} = v_a + 0.0052 \cdot (M - 58) \quad (3)$$

$t_{rm}$  is the average radiant temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ), calculated as:

$$t_{rm} = t_g + 1.9 \cdot \sqrt{v_a} \cdot (t_g - t_a) \quad (4)$$

and  $h_c$  the convection coefficient between air and clothing ( $\text{W}/\text{m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}$ ), is the maximum value between the functions,

$$h_c = \max(2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25}, 12.1\sqrt{v_{ar}}) \quad (5)$$

Equation (1) to calculate  $t_{cl}$  is implicit and is usually solved using iterative methods such as Newton-Rapshon or similar iterative numerical methods. The Newton-Rapson method can have serious convergence problems if the initial point is close to local maximal, minimal or inflection points. Depending on the value assumed by  $t_{cl}$  in (5), equation (1) can be reduced to a polynomial of degree 4 or a polynomial of degree 16.

### Case 1: $h_c = 12.1\sqrt{v_{ar}}$

In this case, equation (1) takes the form:

$$t_{cl} = 35.7 - 0.028M - 0.155I_{cl}[3.96 \cdot 10^{-8}f_{cl}((t_{cl} + 273.15)^4 - (t_{rm} + 273.15)^4) + 12.1f_{cl}\sqrt{v_{ar}}(t_{cl} - t_a)] \quad (6)$$

Making the substitution  $T = t_{cl} + 273.15$ , we get the equation:

$$aT^4 + bT + c = 0 \quad \text{or} \quad T^4 + \alpha T + \beta = 0 \quad (7)$$

whereby,

$$\begin{aligned} a &= 0.6138 \cdot 10^{-8} I_{cl} f_{cl} > 0 \\ b &= 1 + 1.8755 I_{cl} f_{cl} \sqrt{v_{ar}} > 0 \\ c &= -308.85 + 0.028M - 0.6138 \cdot 10^{-8} I_{cl} f_{cl} (t_{rm} + 273.15)^4 - 1.8755 I_{cl} f_{cl} (t_a + 273.15) < 0 \end{aligned} \quad (8)$$

so the problem of calculating  $t_{cl}$  is equivalent to calculating the real roots of the polynomial  $p(T) = T^4 + \alpha T + \beta$  with coefficients  $\alpha = \frac{a}{b} > 0$ ,  $\beta = \frac{c}{a} < 0$

Applying the method followed by Shmakov [7], the polynomial  $P(T)$  is factored as the product of two quadratic polynomials, i.e.,

$T^4 + \alpha T + \beta = (T^2 + g_1 T + h_1)(T^2 + g_2 T + h_2)$ , of (7) are given by:

$$\begin{aligned} T_{1,2} &= \frac{-g_1 \pm \sqrt{g_1^2 - 4h_1}}{2} \\ T_{3,4} &= \frac{-g_2 \pm \sqrt{g_2^2 - 4h_2}}{2} \end{aligned} \quad (9)$$

whereby,

$$g_1 = \sqrt{y}, \quad h_1 = \frac{y + \sqrt{y^2 - 4\beta}}{2} \quad (10)$$

$$g_2 = -\sqrt{y}, \quad h_2 = \frac{y - \sqrt{y^2 - 4\beta}}{2}$$

The variable  $y$  is the solution of the cubic equation:

$$y^3 - 4\beta y - \alpha^2 = 0 \quad (11)$$

As in the model  $\beta < 0$ , we have the discriminant in the Cardano-Tartaglia formula for cubic equations (Filho e Pereira (2019)),

$D = \left(\frac{-4\beta}{3}\right)^3 + \left(\frac{-\alpha^2}{2}\right)^2 = -\frac{64\beta^3}{27} + \frac{\alpha^4}{4} > 0$  is positive, and therefore the cubic equation (11) admits one real root and two complex roots. The real root, in terms of coefficients  $a, b, c$  of equation (7) is given by:

$$y = \sqrt[3]{\frac{b^2}{16} + \sqrt{\frac{b^4}{256a^4} - \frac{c^3}{27a^3}}} \quad (12)$$

By substituting the value of  $y$  into (10) and (9), we have that  $T_1$  e  $T_2$  are complex solutions,  $T_4$  is a negative real solution, and  $T_3$  is the only positive real solution that verifies (7). This solution is given by:

$$T_3 = \frac{1}{2} \cdot \left( -\sqrt{2y + \frac{2c}{3ay}} + \sqrt{-2y + \frac{2b}{a \cdot (2y + \frac{2c}{3ay})}} - \frac{2c}{\sqrt{3ay}} \right) \quad (13)$$

Therefore, the only positive real solution of model (6) is explicitly given by:

$$t_{cl} = T_3 - 273.15 \quad (14)$$

### Case 2: $h_c = 2.38 \cdot (t_{cl} - t_a)^{1/4}$

By doing the substitution  $T = 2.38 \cdot (t_{cl} - t_a)^{1/4}$  in equation (1), the problem is equivalent to determining the roots of the function  $u(T)$ :

$$\begin{aligned} u(T) &= T^4 + t_a - 35.7 + 0.028M \\ &+ 0.155I_{cl} \cdot [3.96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot ((T^4 + t_a + 273.15)^4 - (t_{rm} + 273.15)^4) + 2.38 \cdot f_{cl} \cdot T^5] \end{aligned} \quad (15)$$

$u(T)$  is a polynomial of degree 16 to which an exact solution has not yet been determined, so Newton-Rapson iterative method is used to approximate the positive real root of  $u(T)$  in (15):

$$T_{k+1} = T_k - \frac{u(T_k)}{u'(T_k)}, \quad k = 0, 1, \dots, n \quad (16)$$

whereby,

$$u'(T) = 4T^3 + 0.155I_{cl}[3.96 \cdot 10^{-8}f_{cl}(16T^3(T^4 + t_a - 273.15)^3) + 11.9f_{cl}T^4] \quad (17)$$

The solution  $t_{cl}$  of Case 2 is therefore approximated by,

$$t_{cl} = t_a + \left( \frac{T_n}{2.38} \right)^4 \quad (18)$$

## Results

In the calculation of  $h_c$  in equation (5),

$$2.38(t_{cl} - t_a)^{\frac{1}{4}} > 12.1 \sqrt{v_{ar}} \quad \text{if } t_{cl} - t_a > 668 v_{ar}^2.$$

That is, the Case 2 prevails for very small air speed values, as shown in Figure 1. The differences between the temperatures are 60°C for  $v_{ar} = 0.3m/s$ , 27°C for  $v_{ar} = 0.2m/s$ , 7°C for  $v_{ar} = 0.1m/s$  and 1.7°C for  $v_{ar} = 0.05m/s$ . Therefore, Case 1 predominates in the calculation of  $h_c$  which can be obtained exactly by equation (14).

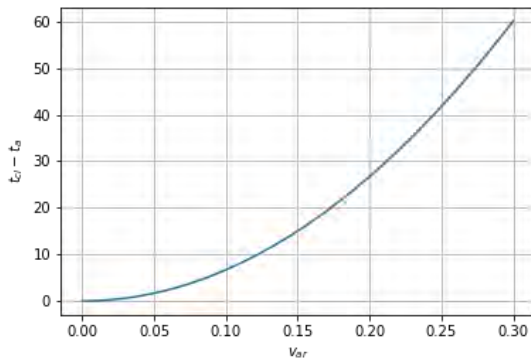


Figure 1. Case 2:  $t_{cl} - t_a > 668 v_{ar}^2$

Since we do not know the value  $t_{cl}$  in the  $h_c$  condition, we start with the initial condition  $t_{cl} = 35.7 - 0.028 \cdot M$  which are the first terms of  $t_{cl}$  in equation (1). If Case 1 initially predominates, the exact solution (14) is immediately applied. Otherwise, if Case 2 is initially dominant, Newton-Raphson method (16) is applied and the condition for  $h_c$  is tested in each iteration, if in any iteration Case 1 is verified the exact solution (14) is applied.

In Lamberts (2012), the thermal comfort condition in an office workstation is determined, in a place with an atmospheric pressure of 101kPa. The data were  $M = 1.2 \text{ met}$ ,  $I_{cl} = 0.75 \text{ clo}$ ,  $t_a = 20^\circ\text{C}$ ,  $v_a = 0,12m/s$  and  $UR = 50\%$ . The reported value of the clothing surface temperature was  $t_{cl} = 26.2^\circ\text{C}$ .

Applied these data to model (1), we have that the initial condition of the clothing surface temperature was  $t_{cl} = 33,74448^\circ\text{C}$ , that value that is far from the expected value of  $26,2^\circ\text{C}$ . The metabolic rate value was  $M = 69,84 \text{ W/m}^2$ , the clothing area factor was  $f_{cl} = 1,125$  and the average radiant temperature was  $t_{rm} = 20^\circ\text{C}$ . With these data we have the Case 1 prevails and the exact solution (14) is calculated with the following function in python:

def pol4(a,b,c):

$$y = ((-c**3/(27*a**3) + b**4/(256*a**4))**(1/2) + b**2/(16*a**2))**(1/3)$$

$$T3 = (-2*y+2*c/(3*a*y))**(1/2)+(-2*y+2*b/(a*(2*y+2*c/(3*a*y))**(1/2)) - 2*c/(3*a*y))**(1/2)/2$$

$$tcl = T3-273.15$$

return tcl

substituting the data in equation (8) to obtain the coefficients a, b e c, the function pol4(a,b,c) returns the value  $t_{cl} = 26.2108015^\circ\text{C}$  confirming the result obtained by Lamberts (2012).

## Discussion

Since in the problem presented by Lamberts (2012), Case 1 predominates, no Newton-Raphson iteration was applied. The exact solution (14) for  $t_{cl}$  is obtained explicitly with the function pol4(a,b,c), the computational cost is of order  $\vartheta(1)$ .

If Newton-Raphson iterative methods is directly applied to equation (1), we have the computational cost of calculating the function and its derivate at each step until a desired degree of accuracy is achieved, and the success of Newton-Raphson method depends strongly on the initial condition used. Table 1 shows the calculations of iterative Newton-Rapson method applied to the problem:

Table 1. Iterative process for the calculation of the clothing temperature

	$h_c$	$u$	$u'$	$t_{cl}$
1	5.155906	16.9612252	2.273076	26.282688
2	5.155906	0.1603254	2.230454	26.210807
3	5.155906	1.43926e-05	2.230053	26.210801
4	5.155906	1.25233e-13	2.230053	26.210801
5	5.155906	6.21724e-15	2.230053	26.210801
6	5.155906	8.88178e-16	2.230053	26.210801

The success in obtaining the exact solution (14), are the values of the coefficients in the polynomial  $P(T) = aT^4 + bT + c = 0$  given by (8). Since  $a > 0, b > 0$  e  $c < 0$  in the model, it follows that there is only one real root, discarding the negative real root and the two conjugate complex roots.

One of the examples that can be applied is in the ENVI-met software, which allows the calculation of PMV/PPD values in the BioMet tab, however, the use is limited to standard reference values in the human body parameters (35 years, male, 1.75 meters and 75 kg), and cannot be modified, (CELIS, 2017). The calculation of the LCT presented in this paper can be inserted into the ENVI-met software extending the parameters of the human body for the calculation of PMV/PPD, without limitations to standard reference values.

## Conclusion

In general, if Case 1 predominates, the only positive real solution for  $t_{cl}$  is identified and calculated by (14). The other solutions are discarded as not being admissible for the problem, thus avoiding the problem of choosing a suitable initial condition for iterative method or to a solution that is not suitable for the problem. The exact solution of  $t_{cl}$  can be applied to analyze the clothing temperature as functions of thermal insulation or in the calculation of the predicted mean vote (PMV).

Schmakov, S. "A universal method of solving quartic equations", *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, 71, Nº 2, 251-259, 2011.

## References

- ASHRAE, ANSI/ASHRAE 55-Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, GA, USA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), 2013.
- Brodoy, E. Xavier, A and Oliveira, R. "Comparative analysis of method for determining the clothing surface temperature ( $t_{cl}$ ) in order to provide a balance between man and the environment," *International Journal of Industrial Ergonomics*, 57, 80-87, 2017.
- CELIS, Anneli. "La influencia de la arborización y de la pavimentación en el confort térmico urbano en la vía pública. Estudio de Caso: Avenida Leopoldo Machado, Macapá- Brasil, 2017. Tesis de Maestría en Arquitectura y Sostenibilidad, Universidad Ricardo Palma, Perú, 2017.
- Filho, J.F.S. Pereira, O. "Revisitando as equações do terceiro grau", *Revista da Sociedade Brasileira de Matemática*, v.7, Nº 2, 205-214, 2019.
- ISO 7730 - International Organization for Standardization, Ergonomics of the thermal environment: analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the pmv and ppd indices and local thermal comfort criteria. Geneva, 2005.
- Lamberts, R. "Conforto e stress térmico", Universidade Federal de Santa Catarina – Centro Tecnológico – Departamento de Engenharia Civil, 2012.
- Moreno, M. "Parâmetros para implementação efetiva de áreas verdes em bairros periféricos de baixa densidade," *Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)*, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2006.
- Oliveira, A. "Avaliação da incerteza na determinação dos índices de conforto térmico PMV e PPD", *Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)*, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Portugal, 2008.
- Santos, J. "O uso do PMV para avaliação do conforto térmico em edifício de escritório tipo plano aberto e sua viabilidade de aplicação em clima quente e úmido", *Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo)*, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2018.

## Modelo de microclima urbano para Valparaíso, Chile. Adaptación del modelo de clima urbano del área de Eixample de la ciudad de Barcelona

Claudio Carrasco<sup>1 2</sup>, Massimo Palme<sup>2</sup>, Antonio Isalgué<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Escuela de Construcción Civil, Universidad de Valparaíso, Chile.

<sup>2</sup> Departamento de Arquitectura, Universidad Técnica Federico Santa María, Chile.

<sup>3</sup> Architecture, Energy and Environment, School of Architecture, Polytechnic University of Catalonia, Spain.

### Abstract

El clima urbano es uno de los efectos de la actividad humana en el territorio, siendo un elemento significativo del antropoceno. El comportamiento térmico de la ciudad y sus distintos barrios depende de variables urbanas como sus cualidades morfológicas, los materiales de construcción (edificios y calles), la actividad dentro de los edificios y la cantidad de tránsito en las calles, la existencia o no de masa de vegetación y de cuerpos de agua, entre otras. Por otra parte, los softwares de simulación que se plantean predictivos de clima y microclima urbano, consideran también la relación de fenómenos temporales de mesoescala y microescala. Sin embargo no son de todo amigables para diseñadores ni urbanistas. Isalgué et. al. (2000) desarrolla el Modelo de Clima Urbano para el Eixample de Barcelona emplazada en la un clima mediterráneo costero y que pone en valor elementos propios del diseño del espacio urbano, aplicable a normativas de edificación y Planos Reguladores. En esta investigación se adapta este modelo para la ciudad de Valparaíso, Chile. Se ajusta el modelo a las condiciones del clima local y se comparan los valores medidos en campo y los simulados con el modelo adaptado. Los resultados muestran una alta correlación entre el desempeño de las variables climáticas medidas en campo y los resultados de aplicar este modelo ajustado. Se obtienen algunos resultados adecuados para planificar climáticamente barrios en latitudes medias costeras, debiéndose desarrollar mejores ajustes en los factores del modelo, para optimizar su aplicación a la ciudad de Valparaíso.

### Introducción

El clima urbano y fenómenos como la isla de calor urbana (UHI) son evidencia de la influencia humana en el proceso del cambio climático. El crecimiento de la urbanización junto al aumento del PIB lo favorecen. Hoy el 55% de la población mundial reside en ciudades. Se espera que para el 2050 éste aumente a un 68% (United Nations, 2019).

Estas crecientes tasas de urbanización han llevado a un aumento de las áreas impermeables que afectan el balance de energía superficial local (Oswald 2020) las áreas urbanas tienen un desempeño climático propio y presentan diferentes temperaturas y humedad del aire que las áreas rurales circundantes (Oke, 1982, Carrasco 2009. Palme et. al. 2017)). Conocer los factores que definen el

desempeño climático urbano es necesario para llevar a cabo acciones y políticas para mitigar el efecto climático en las ciudades y el calentamiento global.

El las ciudades podemos encontrar diversas formas de tejido urbanos que han sido clasificados en algunos estudios. Stewart y Oke (2010) han definido estas características y determinado que en una misma ciudad existen varias Zonas Climáticas Urbanas. En la microescala, dentro de cada tejido, encontramos variedad de formas y materiales y el modelo más utilizado para su investigación es el Canon urbano. como unidad de estudio. De igual manera, las ciudades determinan sus variaciones climáticas globales por su relación con la mesoescala y el paisaje y la topografía circundantes.

La modificación de las superficies terrestres es considerada la causa más importante del aumento de la temperatura, seguida del calor residual de las actividades humanas urbanas (Oropeza-Perez I., 2020). Su impacto en el almacenamiento de calor, y la menor evaporación se encuentran entre las causas del cambio climático originado por la urbanización (Katzschner, L. (2010). El comportamiento térmico de la ciudad y sus distintos barrios depende de variables urbanas como sus cualidades morfológicas, los materiales de construcción (edificios y calles), la actividad dentro de los edificios y la cantidad de tránsito en las calles, la existencia o no de masa de vegetación y de cuerpos de agua, entre otros (Roset J., R. et. al. 1999) (Tsitoura et al 2016), (Carrasco, Palme 2020). Para actuar frente al cambio climático y combatir los efectos negativos asociados al clima urbano debemos evaluar la incidencia de estos elementos de diseño urbano en el clima, en cada escala urbana necesaria. Incluyendo la escala microclimática, donde las normativas de regulación pueden favorecer menores impactos. Se debe determinar la incidencia de estos elementos en la temperatura del aire, la variación de la temperatura del aire, humedad relativa, dirección y velocidad del aire y radiación sobre el cañón urbano. Se necesitan estrategias de planificación urbana exitosas para mitigar los aumentos (excesivos) de la temperatura del aire urbano y reducir las futuras cargas de calor que hay en el cañón (Orehounig et. al. Estas estrategias pueden aumentar la resiliencia en barrios y zonas urbanas.

Por otro lado, los software de simulación de clima urbano, consideran la relación de los fenómenos tanto espaciales como temporales en mesoescala y microescala con los elementos urbanos de la ciudad. Sin embargo, no son del todo amigables con el diseñador o el planificador.

En las últimas décadas se han desarrollado diferentes simuladores como el Local Circulation Model lcm2d; Single-Layer Urban Canopy Model; Hotmac, LM: Lokal Model; FVM: Finite Volume Model; Bubble (Basel Urban Boundary Layer Experiment) y Urbvent, ENVI-met; Urban Weather Generator (UWG) desarrollado por el Massachusetts Institute of Technology (MIT), entre otros. Ochoa & Serra (1998) desarrollaron un modelo de sistema climático urbano (Fig. 1) para explicar que condiciona el comportamiento climático de la ciudad. Correlacionaron cuatro temas urbanos: Ubicación, Forma, Límites y elementos del sistema. Definieron el aspecto de estos temas y finalmente los parámetros del microclima urbano. Isalgué et. al. (2000) desarrolló un modelo de clima para el tejido urbano del Eixample de Barcelona (clima mediterráneo). El modelo presenta tres escalas de clima: en primer lugar la escala de ciudad, luego la escala de barrio y finalmente la escala de cañón urbano. Esas escalas están sucesivamente relacionadas. Este modelo destaca elementos del diseño del espacio urbano, el uso de edificios y el tráfico, la vegetación y cuerpos de agua, etc.; elementos típicos que se utilizan en las normas de construcción y la planificación urbana. En esta investigación, este modelo de clima se adapta para predecir el desempeño microclimático en Valparaíso (clima mediterráneo semiárido), Chile, ubicado en el Océano Pacífico de América del Sur. Se midieron diferentes parámetros tanto climáticos como urbanos dentro del área de estudio para definir el modelo de clima del Eixample adaptado, el que presenta diferentes Ecuaciones para cada parámetro del clima urbano.

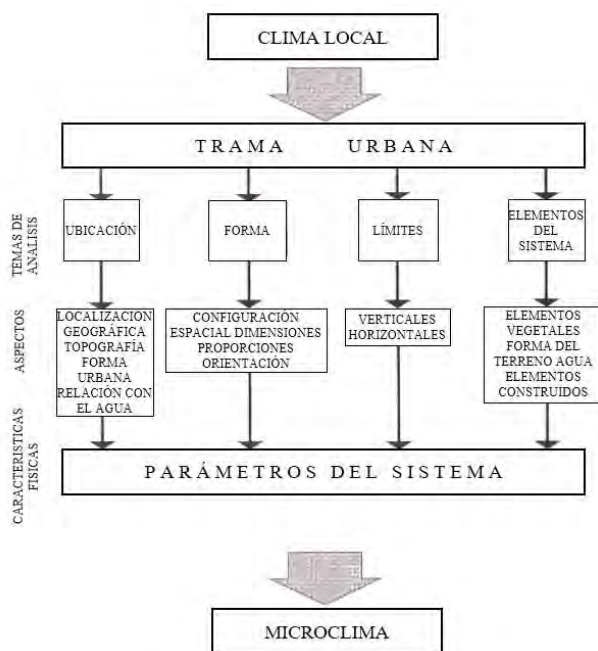


Figura 1: Sistema climático urbano. Adaptado de Ochoa & Serra, 1998.

**VARIABLES DEL MODELO**

De acuerdo al modelo de evaluación, se determinan tres escalas de trabajo que definen el procedimiento.

- 1 Datos de inicio:  
Corresponde a la información de variables de Estado climático entregada por la estación meteorológica: Radiación (R); Temperatura (T); Oscilación de la temperatura ( $\Delta T$ ); Humedad relativa (HR); Intensidad del viento (V); Dirección predominante del viento (dV); Nivel de fondo de sonido(N).
- 2 Descripción del Modelo a Escala Zonal:  
Para la determinación de las características zonales a partir de un área urbana, se considera que influyen los siguientes factores urbanos zonales de estudio, que se señalan en la Tabla 1.

Tabla 1. Factores urbanos zonales que afectan el clima local.

SIMBOLOGIA	FACTOR URBANO ZONAL
ha	Altura estación meteorológica (en metros respecto nivel del mar)
haz (m)	Altura media de la zona (en metros respecto nivel del mar)
altz(°)	Pendiente general del terreno en la zona (en grados)
aztz(°)	Orientación de la pendiente en la zona (en grados respecto del norte)
fhrz(-1,1)= arctg(altura/distancia) /90°	Altura Relativa zonal respecto del entorno (El factor fluctúa entre -1, 1)
faig	Porcentaje de agua en la estación meteorológica (de 0 a 1)
faigz (0,1)= (entre desierto y mar)	Porcentaje de agua en la zona (de 0 a 1)
fveg	Porcentaje de vegetación en la estación meteorológica (de 0 a 1)
fvegz (0,1)= (entre desierto y selva)	Porcentaje de vegetación en la zona (de 0 a 1)
Dact	Densidad de actividad “estática” (relaciona consumos de energía /m2 habitados) en la estación meteorológica (de 0 a 1).
Dactz (0,...)	Densidad de actividad “estática” (relaciona consumos de energía /m2 habitados) (de 0 a 1). Presencia de actividad antrópica.
Dtr	Densidad de transito en la estación meteorológica (de 0 a 1).
Dtrz(0,...)	Densidad de transito en la zona (número de vehículos por hora) (de 0 a 1). Presencia de actividad antrópica
factz= (Dactz-Dact)/ (Dactz+Dact)	Factor de Actividad zonal (relaciona densidad de actividad zonal y densidad de actividad en la estación meteorológica)
ftrz= (Dtrz-Dtr)/ (Dtrz+Dtr)	Factor de transito zonal (relaciona densidad de transito zonal y densidad de transito en la estación meteorológica)

Estas características factorizadas y relacionados entre si, de acuerdo a su incidencia o no, en la determinación de un parámetro de estado climático, determinan los siguientes datos zonales propios de la zona definida (para invierno, primavera, verano y otoño).

Radiación en plano vertical a sur Rz (w)

Temperatura Tz (°C)

Oscilación de la temperatura ΔTz (°C)

Humedad relative HRz (%)

Intensidad del viento

Dirección del viento dVz (azimut respecto al norte en °)

Sonido Nz (dBA)

De acuerdo a la estructura urbana del Eixample de Barcelona, “zona” es considerada, en el modelo, como una superficie del tejido, de 2 x 2 km<sup>2</sup> de dominio.

En este trabajo sólo estudiaremos el comportamiento de la T° del aire y de la variación de la T° del aire.

La siguiente ecuación (1) define la temperatura del aire en la zona de estudio (Tz):

$$Tz = T + 7 \text{ factz} + 4 \text{ ftrz} + ((ha-haz)/180) - 4 \cos \text{aztz} \times \sin \text{altz} + 4 \text{ fhrz} \times \exp(-Vz) + (T - T_{\text{media anual}}) \times (0,5(\text{faig} - \text{faigz}) + (0,2(\text{fveg} - \text{fvegz}))) \quad (1)$$

Donde

T	Temperatura de la estación meteorológica
factz	Factor de Actividad zonal
ftrz	Factor de transito zonal
ha	Altura estación
haz	Altura de la zona
aztz	Orientación de la pendiente
aztz	Pendiente general del terreno
fhrz	Altura relativa
Vz	Viento zonal
T	La Temperatura de la estación meteorológica
Tmedia	Temperatura media anual
faig	Factor Porcentaje de agua
faigz	Factor Porcentaje de agua en la zona
fveg	Factor Porcentaje de vegetación
fvegz	Factor Porcentaje de vegetación en la zona

3a

Descripción del Modelo de Temperatura del aire en el cañón urbano a escala puntual:

La siguiente ecuación (2) define la temperatura del aire en los cañones dentro del área de estudio (Tp) a escala microclimática:

$$Tp = Tz + (\Delta Thr + \Delta Tveg + \Delta Tdens + \Delta Taig) \times \exp(-0,5Vp) + 3 ((Rp - Rz)/Rz) \times \exp(-Vp) \quad (2)$$

Donde

Tz	Temperatura zonal
ΔThr	Incorpora Factor Altura Relativa (fhr)
ΔTveg	Incorpora Factor Porcentaje de vegetación (fveg) Incorpora Humedad Relativa puntual (HR)

ΔTdens	Incorpora Factor densidad de tránsito puntual (ftrp) Incorpora Factor Densidad de actividad puntual (factp) Incorpora Viento puntual (Vp)
ΔTaig	Incorpora Factor de agua puntual (fair) Incorpora Humedad relativa puntual (HR)
Vp	Velocidad puntual del viento
Rp	Radiación Puntual
Rz	Radiación Zonal

Incremento por altura relativa:  
 $\Delta Thr = 0,5 \text{ fhr} (= 0 \text{ si } \text{alcaria} > 0)$   
 Incorpora Factor Altura Relativa

Incremento por vegetación (sin sombra):  
 $\Delta Tveg = -2 \times \text{fveg} \times (100 - HR) / 100$   
 Incorpora Factor Porcentaje de vegetación  
 Incorpora Humedad Relativa puntual

Incremento por densidad:  
 $\Delta Tdens = (\text{ftrp} + 2 \text{ factp}) \times (\exp(-Vp) + 1) / 2$   
 Incorpora Factor densidad de tránsito puntual  
 Incorpora Factor Densidad de actividad puntual  
 Incorpora Viento puntual

Incremento por agua:  
 $\Delta Taig = -6 \times \text{faig} \times (100 - HR) / 100$   
 Incorpora Factor de agua puntual  
 Incorpora Humedad relativa puntual

3b

Descripción del Modelo de Variación de temperatura en el cañón urbano a escala puntual:

La siguiente ecuación (3) define la variación de la temperatura del aire en los cañones dentro del área de estudio (ΔTp) a escala microclimática:

$$\Delta Tp = \Delta Tz \times (1 - 0,1 \times \text{fveg}) \times (1 + 0,5 \times \exp(-Vp)) \times (Rp - Rz) / Rz + 0,6 \times \Delta Tdens \quad (3)$$

Según el modelo, en la determinación influyen los siguientes factores, donde:

ΔTz	Oscilación temperatura zonal
fveg	Factor Porcentaje de vegetación
Vp	Velocidad puntual del viento
Rp	Radiación Puntual
Rz	Radiación Zonal
ΔTdens	Incorpora Factor densidad de tránsito puntual (ftrp) Incorpora Factor Densidad de actividad puntual (factp) Incorpora Viento puntual (Vp)

Este modelo de clima urbano del Eixample de Barcelona identifica tres factores principales en la formación del clima urbano: geometría urbana, materiales impermeables y generación de calor antropogénico.

### Area de estudio y metodología

La presente investigación se desarrolló en la ciudad de Valparaíso, que se encuentra en la zona central de Chile. Es una ciudad costera de clima mediterráneo y con alrededor de 300.00 habitantes. El modelo original está propuesto para un tejido urbano de clima mediterráneo costero (Eixample, Barcelona), que tiene cierta similitud con el de Valparaíso. Por tanto se intenta validar su estructura para un clima de estas características. Se estudió el area central de Valparaíso reconocida como “el distrito bancario y financier” de la ciudad. Estudios anteriores (Carrasco & Palme, 2020), dan cuenta de esta zona como aquella que presenta los mayores índices de isla de calor.



Figura 2: Situación urbana. Izquierda, Valparaíso (33° 3'south). Derecha, Barcelona 41° 23' north).

### Morfología y actividad de la zona de estudio

Se presenta la situación geomorfológica de Valparaíso (figura 3) y la zona de estudio (Figura 4, se observa la zona de estudio y las diferentes alturas de las edificaciones del área), se muestran los factores SVF y HRF (Figura 5). También se analiza información sobre la actividad del tráfico (densidad del tráfico), la actividad dentro de los edificios (densidad de la actividad zonal), la situación del agua y la situación de la vegetación NDVI (Figura 6).

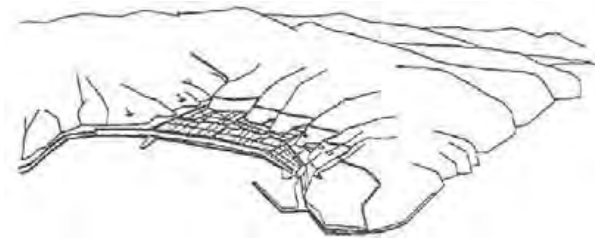


Figura 3: Situación geomorfológica de Valparaíso



Figura 4: Zona de estudio

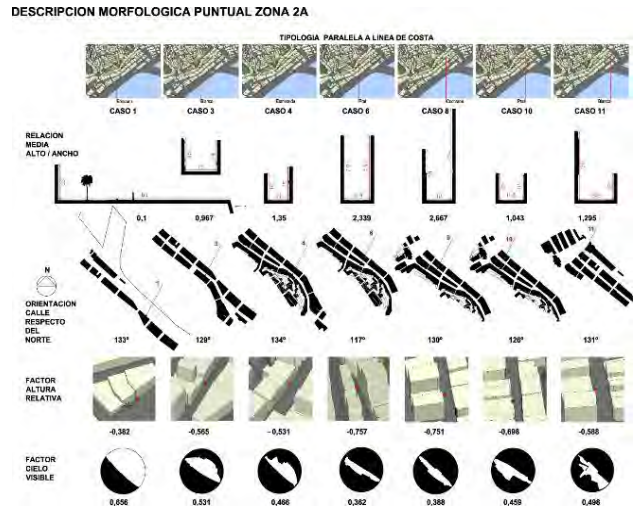


Figura 5: Factor de cielo visible y factor de altura relative de cañones de la zona de estudio.

### Medición in situ y simulación

Se definió una diversidad de puntos de registro de las variables que el modelo climático del Eixample define. Se realizaron campañas de medición en invierno en día despejado y en los horarios de 10:30 am, 2 pm. y 8 pm. Luego se hace un levantamiento de medidas de Temperatura (°C) y Oscilación de la temperatura (°C) en los lugares puntuales de estudio de la zona.

Luego se levantan los antecedentes de los factores urbanos que el modelo define.

Con el levantamiento de los factores urbanos se simulan los resultados de T° del aire y variación de la T° en el modelo del Eixample adaptado y se comparan con los registros en terreno.

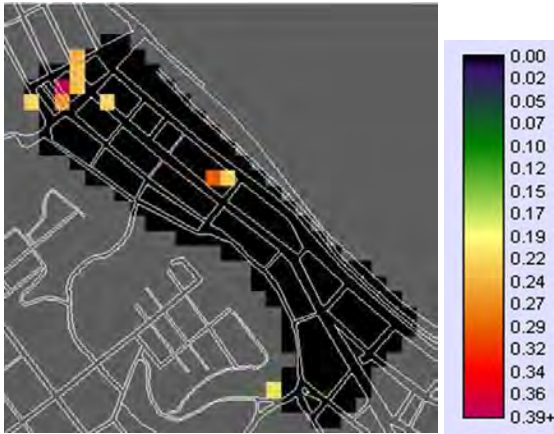


Figura 6: NDVI de la zona (Rango 0 – 1) Se observa el bajo porcentaje de vegetación en la zona de estudio.

## Resultados

La primera consideración para la adaptación del modelo del Eixample se origina en las diferencias de latitud entre Valparaíso (33°S) y Barcelona (41°N), que determina diferencias en radiación recibida sobre las superficies y al interior del cañón. En latitudes más bajas como la de Valparaíso, hay una mayor participación de radiación desde el suelo, por lo tanto, se estima apropiado considerarla, y no sólo la radiación solar en plano vertical (considerada en el Modelo original), sino que también en plano horizontal. Respecto de la temperature superficial de los cañones, se observe una importante relación entre las condiciones morfológicas de cada cañón estudiado y la temperature superficial promedio como se muestra en la figura 7. Se observa un  $R^2$  0.8311.

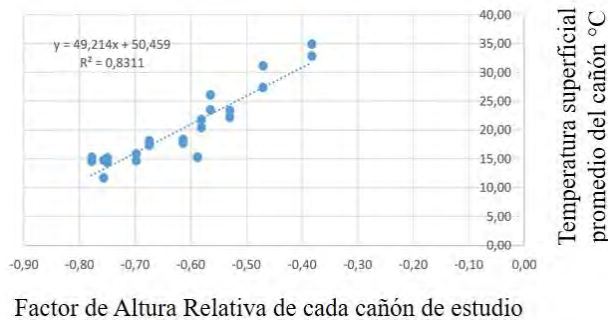


Figura 7: Relacion entre la temperature superficial promedio del canon y Factor morfológico de Altura Relativa.

La alta correlación entre Radiación al interior del cañón y Factor de Altura Relativa (FHR) permite ajustar el modelo adaptando su estructura en el cálculo de Radiación Puntual.

La incorporación de otros factores, no expuestos en esta presentación, como el Factor de Densidad Zonal (densz) y el Factor de Densidad Frontal Zonal (densfz), ajustan el modelo respecto del comportamiento de Radiación y de Velocidad de Viento hacia y desde el mar (Océano pacífico). El descriptor Densidad Zonal (densz)

caracteriza la ocupación de suelo e informa el porcentaje de radiación que es obstruido por las edificaciones.

Para el caso particular de la ciudad de Valparaíso, los elementos de vegetación, quedan confinados principalmente a las plazas públicas sin mayor presencia en la calle.

Los resultados del estudio comparativo entre los valores obtenidos de la simulación y los registrados en terreno mostraron un  $R^2$  0.81 y un coeficiente de correlación 0.9 entre los valores del modelo adaptado y los medidos en el cañón urbano en la variable temperatura del aire (Fig. 8). Y se obtuvo un  $R^2$  0.84 y un coeficiente de correlación 0.92 entre los valores resultantes de aplicar el modelo y los medidos en el cañón urbano, para la variable Variación de la Temperatura del Aire, en días soleados en invierno (Fig. 9).

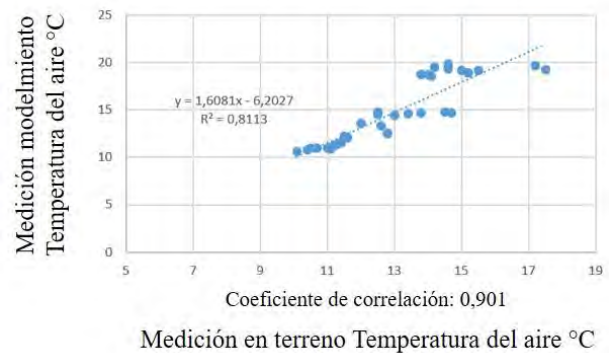


Figura 8: Relacion entre los registros en terreno de la temperatura del aire y la modelada

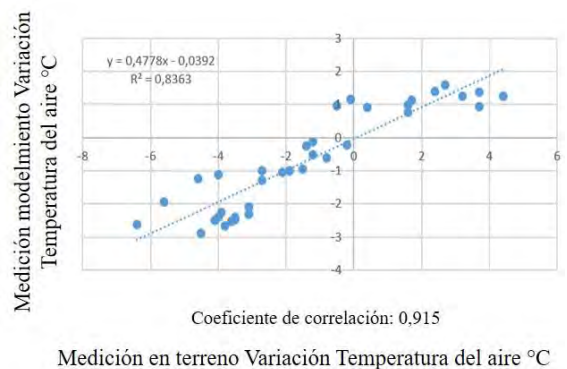


Figura 9: Relacion entre los registros en terreno de la variación de la temperatura del aire y la modelada.

## Conclusiones

Este trabajo correspondiente a los resultados del modelamiento climático del distrito bancario financiero de la ciudad de Valparaíso utilizando el modelo del Eixample de Barcelona desarrollado por Isalgué (op.cit. 2000) y adaptado a las condiciones locales de la ciudad. Este modelo se considera adecuado a tejidos emplazados en clima mediterráneo de costa. Considera elementos morfológicos y energéticos, de agua y de vegetación, todos elementos característicos de sus espacios urbanos y existentes en climas de estas características.

Si bien, el modelo utilizado se presenta como un modelo de promedios climáticos diarios, su estructura es muy



apropiada a espacios urbanos y cañones emplazados en condiciones climáticas de costa.

El modelo de clima urbano adaptado facilita el evaluar y simular el desempeño climático de tejidos geométricos como el analizado y modelado en Valparaíso.

El modelo considera variables de diseño urbano que los planificadores y urbanistas usan en la definición de sus planes de diseño urbano y planos de regulación de las edificaciones en la ciudad y por tanto en una importante herramienta de planificación de la ciudad respecto de su clima.

## Referencias

- Isalgué, A. J. Roset and H. Coch, (2000). Environmental Evaluation of an Urban Sector. Proceedings International Building Physics Conference. Eindhoven, Netherlands. p. 429-436.
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2019). World Urbanization Prospects: The 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420). New York: United Nations.
- Oswald, SM; B. Hollosi, M. Zuvela-Aloise, L. See, S. Guggenberger, W. Hafner, G. Prokop, A. Storch, W. Schieder, (2020). Using urban climate modelling and improved land use classifications to support climate change adaptation in urban environments: A case study for the city of Klagenfurt, Austria. *Urban Climate*. 31, 100582.
- Oke, T. R., (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 108 (455): 1-24.
- Carrasco, C., (2009). Morfología y microclima urbano análisis de la forma espacial y materiales como modeladores del microclima de tejidos urbanos mediterráneos costeros: el caso de la ciudad de Valparaíso. Doctoral dissertation Barcelona. <http://www.tdx.cat/handle/10803/51572>.
- Palme, M., L. Inostroza, G. Villacreses, A. Lobato, C. Carrasco, (2017). From urban climate to energy consumption: Enhancing building performance simulation by including the urban heat island effect. *Energy and Buildings* 145 (5), 107- 6.
- Stewart, I.D. and T. R. Oke, (2010) Thermal Differentiation of “Local Climate Zones” Using Temperature Observations from Urban and Rural Field Sites. 9th Symposium on Urban Environment, Keystone, CO, 1-6, American Meteorological Society.
- Oropeza-Perez I., (2020). Simplified Numerical Model for Analyzing the Effects of the Urban Heat Island upon Low-Rise Buildings by Using a Free-License Thermal Simulation Program. *Urban Sci.*, 4, 30.
- Roset J., R. Serra, A. Isalgué, H. Coch, (1999). Energetic analysis for an urban sector of Barcelona. REBUILD 3rd International Conference: Rebuilding the Cities of Tomorrow, Barcelona, p. 206-209.
- Tsitoura, M., M. Michailidou, T. Tsoutsos, (2016). Achieving sustainability through the management of microclimate parameters in Mediterranean urban environments during summer. *Sustainable Cities and Society* 26. 48–64.
- Carrasco C., M. Palme (2020). Urban form and urban materials as controller of urban climate in Valparaíso, Chile. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 503.
- Katzschner, L. (2010). Urban climate in dense cities. In: NG, E. (Ed.). *Designing high-density cities for social and environmental sustainability*. London: Earthscan, cap. 7, p. 71-78.
- Orehounig, K., A. Mahdavi, E.-M. Doppelbauer, W. Loibl, T. Tötzer, (2014). Projections of design implications on energy performance of future cities: a case study from Vienna. *Sustainable Cities and Society*, 12, 92–101
- Kimura F., P. Manins, (1988). Blocking in periodic valleys. *Boundary-Layer Meteorology*, 44, 137–169.
- Lee, S. H. and F. Kimura, (2001). Comparative studies in the local circulations induced by land-use and by topography. *Boundary-Layer Meteorology*, 101, 157-182.
- Kusaka, H., H. Kondo, Y. Kikegawa, F. Kimura, (2001). A Simple Single-Layer Urban Canopy Model for Atmospheric Models: Comparison with Multi-Layer and Slab Models *Boundary-Layer Meteorology*, 101, 329-358.
- Yamada T., (2004) Merging CFD and atmospheric modeling capabilities to simulate airflow and dispersion in urban areas. Fourth Asian Workshop on Computational Fluid Dynamics. University of Tokio. *Computational Fluid Dynamics journal* 13. pp. 329-341.
- Germano M., (2006). Qualitative modelling of the natural ventilation potential in urban context. Tesis Doctoral. Faculté environnement naturel, architectural et construit. Laboratoire d'énergie solaire et physique du bâtiment. Section d'architecture. Lausanne, EPFL Ecole Polytechnique Federale de Lausanne.
- M. Bruse, M. Nikolopoulou, (2004). Tools for planning and Design at Micro-Scale; Conference paper: Urban Green Space in Europe: New Approaches and Future Challenges, 15-16.
- [20]Bueno, B., L. Norford, J. Hidalgo, G. Pigeon, G. (2012). The urban weather generator. *Journal of Building Performance Simulation* 6 (4), 1-13.
- Ochoa J.M., R. Serra, (1998). Microclimatic analysis of some urban scenarios, *Environmental Friendly Cities*, Proceedings of PLEA '98. Lisbon. Ed. James2 & James, London, U.

## Impact of Adopting Simplified Thermal Load Models in the Simulation of Thermal Energy Storage Integrated into Air-Source Heat Pumps

Conrado Ermel<sup>1</sup>, Marcus V.A. Bianchi<sup>2</sup>, Lara W. Vieira<sup>1</sup>, and Paulo S. Schneider<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil

<sup>2</sup>National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO

### Abstract

Integrating thermal energy storage (TES) into air source heat pumps (ASHP) is an alternative that may leverage their deployment in the next years. The simulation of such systems often requires detailed models running 8.760 h with hourly time steps, hence, increasing the computational effort. In this paper, we explore how thermal load models with distinct levels of detail affect the results of ASHP-TES simulations. Assuming EnergyPlus results as standard we find that the 5R1C model shows 10 % deviation, being much faster. Meanwhile, residential load factor methods deviated up to 20 % from the standard result.

### Introduction

Heat pumps can support the transition from fossil fuel appliances to electrified heating systems, which may foster the decarbonization of the building sector (Le et al. 2019). Heat pumps can supply heating demands up to five times more efficiently than electric resistances by running a vapor compression cycle (Dincer, Rosen, and Ahmadi 2017). The higher efficiency aligned with the fast growth of renewables' share in the world energy mix suggests an increase in the deployment of heat pumps in the near future (Bianco, Scarpa, and Tagliafico 2017). There have been several recent scientific publications exploring the adoption of heat pumps to replace combustion appliances. Most of those studies rely on simulation models, a less expensive option than experiments, and an increasing number of simulation platforms for heat pumps have been documented (Witte and Tuschy 2020).

When simulating the operation of TES integrated into ASHP, one has to account for the type of storage, the characteristics of the ASHP, and the operation logic of the system (Ermel et al. 2022). Commonly, average values for the weather condition are not enough to represent the system's behavior over large periods (Ermel, Bianchi, and Schneider 2022a). Therefore, hourly timesteps over 8760 hours are employed, which significantly adds computational effort. Simplifications of the models introduce errors that, depending on their magnitude, may negatively affect the results.

In this study, we assess the impact of adopting simplified heating load models on the performance of ASHP-TES systems. A Python simulation framework, devel-

oped by the authors (Ermel, Bianchi, and Schneider 2022b), was used to compare the distinct models. This open-source library is aligned with current trends toward free-access tools and publications. The original library adopted the load factor method (LFM) to predict the heating load, hence, the present study assesses the gains of adopting an improved method based on electric circuit analogy (5R1C model) that accounts for the building's thermal inertia, as well as for the solar gains.

### Thermal Load Models

#### Residential Load Factor

The simplest heating load model explored is the residential load factor from standard 169-2021 (ANSI/ASHRAE 2021). The model employs simplifying conservative assumptions, like neglecting solar gains, to calculate steady-state heat losses through walls, windows, ceilings, and floors. Internal gains like appliances and occupation can be included in a simplified way, yet the building's thermal mass is ignored (ASHRAE 2005). The model is indicated for peak load calculations, hence, it is widely adopted for sizing HVAC, not being indicated for hourly load calculation. Eq. 1 shows an example of the calculation method when heat transfer through the ceiling and walls is considered.

$$\dot{Q}_{\text{load}[i]} = A_w U_w (T_{\text{amb}[i]} - T_{\text{sp}}) + A_c U_c (T_{\text{amb}[i]} - T_{\text{sp}}), \quad (1)$$

where  $A_w$  and  $A_c$  are the wall and ceiling area and  $U_w$  and  $U_c$  are the overall heat transfer coefficient.

#### Electric Circuit Analogy - 5R1C

Models with intermediary complexity, such as representing the building through a set of thermal resistance (R) capacitance (C) elements, have been receiving growing attention (Vivian et al. 2017). They allow the inclusion of relevant parameters like the building thermal inertia as a capacitance component and the heat transfer mechanisms as a function of temperatures and resistances. The 5R1C model (5 resistances and 1 capacitor), presented in Fig. 1, was first proposed by (ISO 2006).

For each time step the following set of equations must be solved. The building mass temperature for the cur-

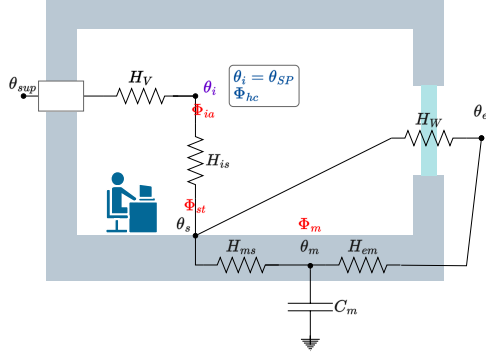


Figure 1: 5R1C thermal load model.

rent time step is calculated by

$$\theta_{m,t} = \frac{[\theta_{m,t-1}(10^{-6}C_m - 0.5(H_3 + H_{em})) + \Phi_{mtot}]}{[10^{-6}C_m + 0.5(H_3 + H_{em})]}, \quad (2)$$

and the heat rate at node  $m$  is

$$\Phi_{mtot} = \Phi_m + H_{em}\theta_e + H_3 \frac{[\Phi_{st} + H_w\theta_e + H_1(\frac{\Phi_{ia} + \Phi_{HC,n}}{H_v}) + \theta_{sup}]}{H_2}. \quad (3)$$

The heat fluxes  $\Phi_{ia}$ ,  $\Phi_{HC,n}$ , and  $\Phi_m$  are described in detail in (ISO 2006).  $\theta_{sup}$  is the air temperature supplied by the HP. Given the thermal inertia, the resulting building mass temperature is an average between  $\theta_{m,t}$  and  $\theta_{m,t-1}$

$$\theta_m = \frac{(\theta_{m,t} + \theta_{m,t-1})}{2} \quad (4)$$

The inner surface temperature can be calculated by

$$\theta_s = \frac{[H_{ms}\theta_m + H_w\theta_e + H_1(\frac{\Phi_{ia} + \Phi_{HC,n}}{H_v})]}{H_{ms} + H_w + H_1} \quad (5)$$

while the indoor air temperature is

$$\theta_i = \frac{[H_{is}\theta_s + H_v\theta_{sup} + \Phi_{ia} + \Phi_{HC,n}]}{H_{is} + H_v} \quad (6)$$

The solution for the combination of serial-parallel RC circuits is

$$H_1 = \frac{1}{\frac{1}{H_v} + \frac{1}{H_{is}}} \quad (7)$$

$$H_2 = H_1 + H_w \quad (8)$$

$$H_3 = \frac{1}{\frac{1}{H_2} + \frac{1}{H_{ms}}} \quad (9)$$

The parameters for the equation set is detailed in the case study section.

## EnergyPlus

Detailed simulations are often obtained with the help of commercial simulation software. In this paper, the benchmark results for the heating load were obtained with simulations from EnergyPlus, where the standard dwelling was configured to match the case study.

## ASHP- TES System

### Air Source Heat Pump

Heat pumps use a vapor compression cycle to transfer energy from a cooler environment (outside) to a hotter environment (inside). When integrated to TES, several arrangements can be of interest. The system simulated in this study is illustrated in Fig 2. The ASHP is modeled as a quasi-steady-state representation of the vapor compression cycle, which was proposed by the authors (Ermel, Bianchi, and Schneider 2022b). Each component is an object that joins into a larger object to depict the operation of a heat pump, allowing the user to modify the design and operating parameters.

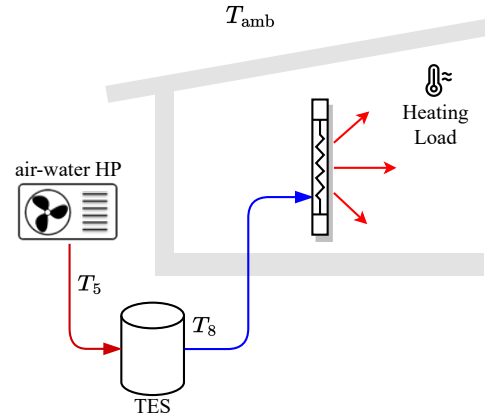


Figure 2: System diagram. Thermal storage integrated to an air source heat pump

The enthalpy marching solution procedure (Winkler, Aute, and Radermacher 2008) is adopted with all the components being solved at each iteration. The pressure levels at points 1 and 2 are guessed, and the refrigerant mass flow rate is calculated by

$$\dot{m}_r = \rho_1 V_{comp} (n/60) \eta_{vol}, \quad (10)$$

where  $V_{comp}$  is the displacement [ $m^3$ ],  $n$  the compressor rotation speed [rpm],  $\eta_{vol}$  the volumetric efficiency. Eq. 11 is the energy balance applied to the evaporator (external unit)

$$\dot{Q}_e = \dot{m}_r(h_1 - h_4) = U_e A_e (T_{me} - T_{air,outdoor}). \quad (11)$$

A water tank is selected for sensible thermal storage because of its availability and low cost. In HVAC, wa-

ter has been adopted to store sensible and latent heat, both for space (Sun et al. 2022), and water heating (Minglu et al. 2020).

### Performance Metrics

The energy consumed by the ASHP and the ASHP- TES system is calculated by

$$E = \sum_{i=0}^{8760} \dot{W}_{c[i]}, \quad (12)$$

and the cost is the operation cost, calculated by multiplying the energy consumed by the electricity rate

$$C_{op} = \sum_{i=0}^{8760} \dot{W}_{c[i]} E_{l_r[i]}. \quad (13)$$

In this study, the electricity rate is assumed to be constant as 0.13 US\$/kWh (EIA 2022).

### Case Study

Three cases were simulated to compare the performance of the ASHP- TES system of Fig. 2 and its dependence on the heating load data. In each round the model was fed with data from a different heating load model: i) Load factor model (LFM), ii) Electric circuit analogy (5RIC), and iii) EnergyPlus simulations (Eplus).

We considered the single-family detached dwelling studied by (Michalak 2019) as the standard case, Fig. 3. The house characteristics are listed on Tab. 1

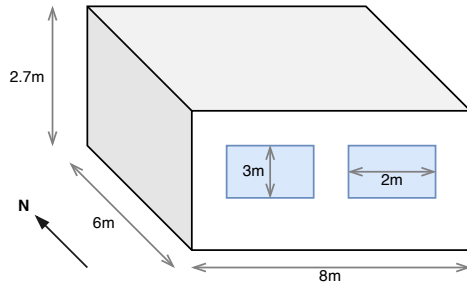


Figure 3: Standard dwelling considered in the simulations

and hourly climate data of Denver-CO for 2020 was obtained from the EnergyPlus database.

The system is operated according to the logic presented in Fig. 4. Although it is simple, it represents a real system, based on an ON-OFF logic. Whenever the outside temperature is below the system set point  $SP_2 = 0^\circ\text{C}$ , the TES will be discharged to prevent the heat pump from operating with low COP. When operating in **Mode 1** the ASHP is charging the TES which is supplying heat for the dwelling. In **Mode 2**, the

Table 1: Building parameters adopted for the 5RIC model

Parameter	Value	Unit
$A_f$	48	$[\text{m}^2]$
$A_m$	139.91	$[\text{m}^2]$
$A_{tot}$	216	$[\text{m}^2]$
$V_{build}$	129.6	$[\text{m}^3]$
$C_m$	$3 \times 10^6$	$[\text{J K}^{-1}]$
$h_{is}$	3.45	$[\text{W m}^{-2} \text{K}]$
$H_{VE}$	20.86	$[\text{W K}^{-1}]$
$H_{is}$	500	$[\text{W K}^{-1}]$
$H_W$	50	$[\text{W K}^{-1}]$
$H_{ms}$	1200	$[\text{W K}^{-1}]$
$H_{em}$	60.89	$[\text{W K}^{-1}]$

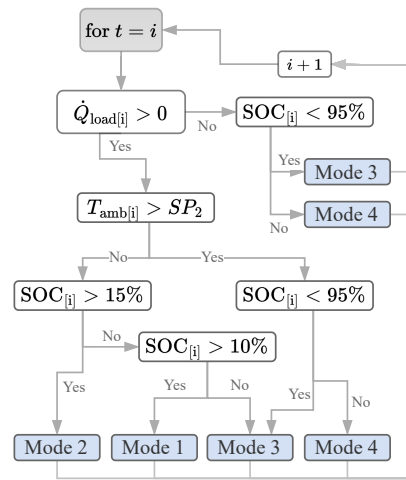


Figure 4: Operation logic. SOC: State of Charge [%]

ASHP is off, and the TES is discharged. **Mode 3** is used when there is no heating demand and the ASHP is only charging the TES. Finally, **Mode 4** means there is no heating demand and the SOC  $> 95\%$ , hence, the ASHP is shut off. It is important to highlight that improved control logic could be employed, especially when focusing on cost savings by adopting time-of-use electricity rates.

## Results

### Thermal Load Calculation

The predictions of the three models for the annual heating demand for Denver in 2021 are presented in Fig. 5. We excluded from the calculation the months from May to September, given the negligible heating demands of these months. During the heating season, the heating demands varied from 0 kWh to 2 kWh. At first sight, the results follow a similar trend, presenting the largest variations among them occurring from

January to April.

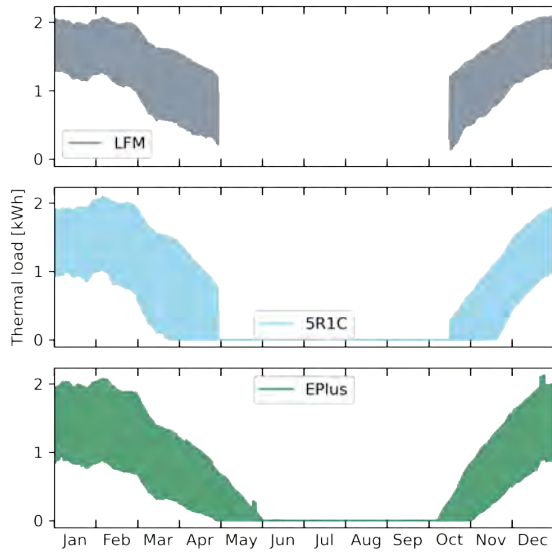


Figure 5: Heating load calculated with: LFM method, 5R1C, and EnergyPlus

The zoomed views at specific periods, Fig. 6, allow mapping the models' weaknesses. For instance, at the beginning of the year (0 h to 40 h) their behavior is similar, however, the effects of neglecting the building thermal inertia (LFM model) become evident from 7.400 h to 8.050 h. The LFM and 5R1C methods are more susceptible to the thermal amplitude, however, because the last one accounts for the energy stored in the building mass, its results present better agreement with the ones of EnergyPlus.

### Performance of the ASHP- TES System

Once the differences between the models were mapped, we calculated the influence of the distinct heating demand profiles on the ASHP- TES system's performance. Fig. 7 displays the system operating temperatures over the year with time steps of one hour.  $T_5$  is the water temperature leaving the ASHP and feeding the water tank, which is considered to be at a uniform temperature  $T_8$ . For the ASHP operating without a TES, the water circuit is considered to be constant, therefore, COP is a function of the outdoor temperature  $T_{amb}$  only. When a sensible TES is integrated into the ASHP, the COP becomes a function of both the  $T_{amb}$  and  $T_8$ . For this reason, during the months of mild temperature, often the  $COP_{ASHP}$  is higher than  $COP_{ASHP- TES}$ .

The simulation results when the model is fed with the three distinct heating load profiles are presented in Tab. 2. The 5R1C model predicted a slightly bigger an-

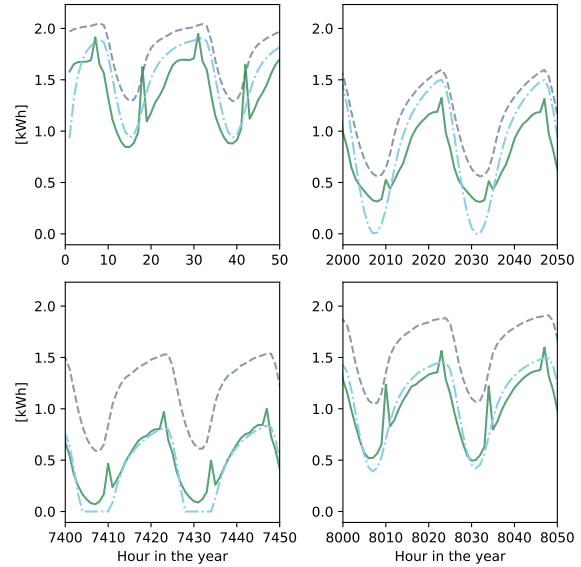


Figure 6: Zoom in four distinct periods of the year. LFM: Dashed line, 5R1C: Dash-Dotted line, and EnergyPlus: Solid line

Table 2: Simulation Results

Parameter / Model	EPlus	5R1C	LFM
Heating load [MWh/yr]	4.51	4.82	6.50
Energy ASHP [MWh/yr]	1.44	1.59	2.08
Energy TES [MWh/yr]	1.37	1.44	1.51
Energy saving [%]	5%	9%	27%
Cost ASHP [US\$/yr]	246	270	354
Cost TES [US\$/yr]	234	245	257

nual heating demand, however, the LFM overpredicted it in 44 %. Because the cost is calculated as presented in Eq. 12, its variations will follow the energy trend.

The differences in the heating load cause the changes observed in the energy consumed by the ASHP and ASHP- TES systems. For the 5R1C model, the heating load varied 6.9 % from EnergyPlus, which generated variations of 9.8 % and 4.6 % for the ASHP and ASHP- TES, respectively. The LFM in turn, had the ASHP consumption changed in the same order of magnitude that the heating load (44 %), while the ASHP- TES system was increased 9.9 % only, as shown in Fig. 8. LFM was more susceptible to the variations in  $T_{amb}$ , which resulted in an overpredicted value of the annual heating load. Moreover, the fluctuations in the heating load profile generated an inconsistent prediction of the ASHP- TES energy consumption. Evaluating the energy consumption when introducing a TES, savings of 5 % are expected when running EnergyPlus, 9 % for the 5R1C model, and 27 % if the simulation is

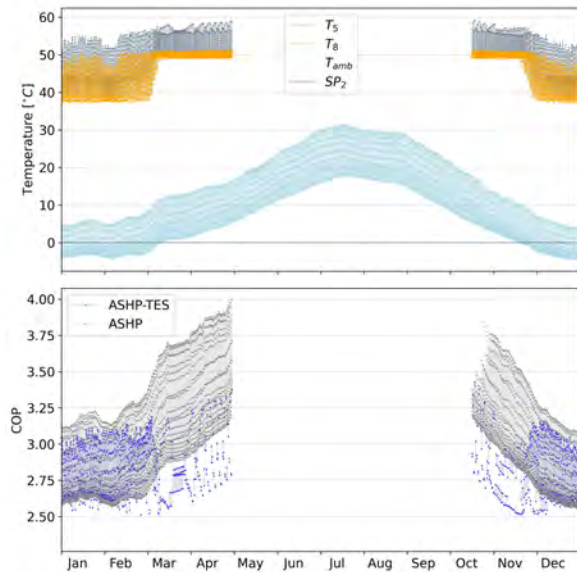


Figure 7: Performance operation results using the EnergyPlus heating load profile

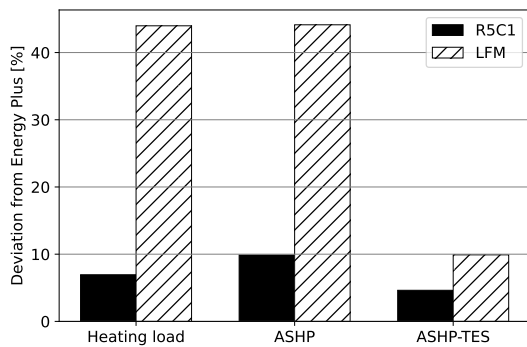


Figure 8: Results deviation to EnergyPlus

feed with data from the LFM.

## Conclusion

Simulation frameworks have been widely used when evaluating the integration of thermal storage into air-source heat pumps. The endeavor of making such simulations faster, but keeping accuracy, resulted in the application of simplified models. Often, these models introduce deviations that may compromise the viability of the results. In this paper, we present the impact of using simplified heating load models when simulating the performance of ASHP-TES systems. The comparison indicates that the deviation introduced by simplified models like the LFM generates errors in final results that are not proportional to the differences in the heating load. The mismatch between the variations

on the ASHP and ASHP-TES performance in comparison with the EnergyPlus model is probably due to the sensibility of the LFM model regarding variations in  $T_{amb}$ , and the fact the model neglects the building's thermal inertia. The error introduced by the LFM generated inaccurate performance results, far from reality. On the other hand, using the 5R1C model caused the systems' performance to vary up to 10% in comparison to the EnergyPlus results. Such a difference may still be acceptable, depending on the assessment goal. The presented assessment suggests the 5R1C is a strong candidate to replace detailed heating demand models, alleviating computational effort in ASHP-TES simulation.

## Acknowledgment

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior-Brasil (CAPES) - Finance Code 001. Conrado Ermel and Lara W. Vieira acknowledge Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Brazil for his Ph.D. grant. Paulo S. Schneider acknowledges CNPq for his research grant (PQ301619/2019-0). This work was authored in part by the National Renewable Energy Laboratory, operated by Alliance for Sustainable Energy, LLC, for the U.S. Department of Energy (DOE) under Contract No. DE-AC36-08GO28308. Funding provided by the U.S. Department of Energy Office of Energy Efficiency and Renewable Energy Building Technologies Office. The views expressed in the article do not necessarily represent the views of the DOE or the U.S. Government. The U.S. Government retains and the publisher, by accepting the article for publication, acknowledges that the U.S. Government retains a nonexclusive, paid-up, irrevocable, worldwide license to publish or reproduce the published form of this work or allow others to do so, for U.S. Government purposes.

## Nomenclature

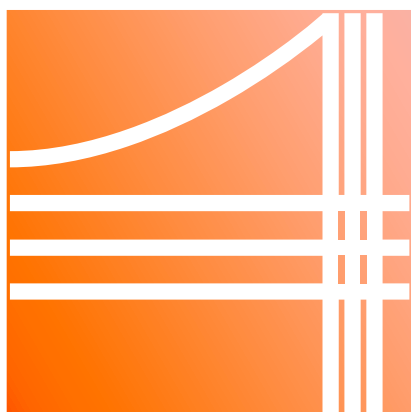
$A_w$	Wall area
$A_c$	Ceiling area
$n$	Compressor rotation speed
$R_{fin}$	Fin ratio
$sp$	Temperature set-point
$U$	Overall heat transfer coefficient
$\Phi$	Heat fluxes
$\theta_{sup}$	Temperature of supplied air
$\theta$	Building mass temperature

## References

- ANSI/ASHRAE. 2021. "ANSI/ASHRAE Standard 169-2021 - Climatic Data for Building Design Standards." Technical Report, ANSI/ASHRAE,

- Peachtree Corners.
- ASHRAE. 2005. *2005 ASHRAE Handbook—Fundamentals (SI)*. Atlanta, GA, USA: ASHRAE.
- Bianco, Vincenzo, Federico Scarpa, and Luca A. Tagliafico. 2017. “Estimation of Primary Energy Savings by Using Heat Pumps for Heating Purposes in the Residential Sector.” *Applied Thermal Engineering* 114:938–947.
- Dincer, Ibrahim, Marc A. Rosen, and Pouria Ahmadi. 2017. *Optimization of Energy Systems*. First. John Wiley and Sons Ltd.
- EIA. 2022. Average Price of Electricity to Ultimate Customers by End-Use Sector.
- Ermel, Conrado, Marcus V. A. Bianchi, and Paulo S. Schneider. 2022a, December. “Energy Model to Evaluate Thermal Energy Storage Integrated with Air Source Heat Pumps.” *ASHRAE 2022 Buildings XV International Conference*. Clearwater, FL.
- Ermel, Conrado, Marcus V.A. Bianchi, Ana Paula Cardoso, and Paulo S. Schneider. 2022. “Thermal Storage Integrated into Air-Source Heat Pumps to Leverage Building Electrification: A Systematic Literature Review.” *Applied Thermal Engineering* 215 (October): 118975.
- Ermel, Conrado, Marcus V.A. Bianchi, and Paulo S. Schneider. 2022b. “Energy Model of an Air Source Heat Pump to Explore Performance Improvements under Cold Conditions: A Python™ Framework.” *7th International High Performance Buildings Conference at Purdue*. Indiana.
- ISO. 2006, October. ISO/FDIS 13790:2006(E) Energy Performance of Buildings — Calculation of Energy Use for Space Heating and Cooling - Draft for Comments by CEN and ISO WG.
- Le, K.X., M.J. Huang, N.N. Shah, C. Wilson, P.M. Artain, R. Byrne, and N.J. Hewitt. 2019. “Techno-Economic Assessment of Cascade Air-to-Water Heat Pump Retrofitted into Residential Buildings Using Experimentally Validated Simulations.” *Applied Energy* 250:633–652.
- Michalak, Piotr. 2019. “A Thermal Network Model for the Dynamic Simulation of the Energy Performance of Buildings with the Time Varying Ventilation Flow.” *Energy and Buildings* 202 (November): 109337.
- Minglu, Q., Z. Rao, C. Jianbo, C. Yuanda, Z. Xudong, Z. Tongyao, and L. Zhao. 2020. “Experimental Analysis of Heat Coupling during TES Based Reverse Cycle Defrosting Method for Cascade Air Source Heat Pumps.” *Renewable Energy* 147:35–42.
- Sun, Yuying, Xu Chen, Shangjiang Wu, Wenzhe Wei, Wei Wang, and Shiming Deng. 2022. “Performance Analysis of Air Source Heat Pump Space Heating System with an Adaptive Control for Supply Water Temperature.” *Applied Thermal Engineering* 211 (October 2021): 118401.
- Vivian, Jacopo, Angelo Zarrella, Giuseppe Emmi, and Michele De Carli. 2017. “An Evaluation of the Suitability of Lumped-Capacitance Models in Calculating Energy Needs and Thermal Behaviour of Buildings.” *Energy and Buildings* 150 (September): 447–465.
- Winkler, Jonathan, Vikrant Aute, and Reinhard Radermacher. 2008. “Comprehensive Investigation of Numerical Methods in Simulating a Steady-State Vapor Compression System.” *International Journal of Refrigeration* 31 (5): 930–942.
- Witte, Francesco, and Ilja Tuschy. 2020. “TESPy: Thermal Engineering Systems in Python.” *Journal of Open Source Software* 5 (49): 2178 (May).

# VII CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE SIMULAÇÃO DE EDIFÍCIOS



**IBPSA LATAM**  
9-10 MAR | 2023  
**FLORIANÓPOLIS**

## Organização

---



lab**EEE**

## Patrocinadores

---



## Apoio

---

