

Monitoreo post-ocupación y simulación de un edificio bioclimático no residencial durante la transición primavera-verano en clima de máxima irradiancia

Post-occupation monitoring and simulation of a non-residential bioclimatic building during the spring-summer transition in maximum irradiance weather.

Filippín, Celina

CONICET, CC302, Santa Rosa, 6300 La Pampa, Argentina

Email: cfilippin@cpenet.com.ar

Flores Larsen, Silvana

Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO), Universidad Nacional de Salta – CONICET

Avenida Bolivia 5150, (4400) Salta, Argentina

Email: seflores@unsa.edu.ar

Código del manuscrito: 10_008

Fecha de aceptación: 04/10/2019

Resumen

Este trabajo describe el diseño de un edificio solar para INTA en Victorica, una ciudad ubicada en la provincia de La Pampa, Argentina (37°38'S, 63°34'W, 175 m sobre el nivel del mar). Se encuentra en el límite entre las zonas bioambientales IIIa y IVb, que según la Norma IRAM 11603 se corresponden con áreas de máxima irradiancia. Los objetivos de este trabajo son analizar el comportamiento higrotérmico y energético del edificio en un periodo de transición primavera-verano bajo condiciones de uso, evaluar las condiciones de confort interior y obtener un modelo termofísico calibrado que permita representar el edificio y utilizarlo en estudios posteriores. Las pautas generales de diseño fueron: minimizar el consumo de energía convencional en el acondicionamiento de iluminación térmica, utilizar la tecnología tradicional, maximizar el confort visual y térmico y alcanzar un costo adicional inferior al 10%. Las estrategias de diseño fueron: ganancias solares directas para calentar el edificio en invierno, ventilación e iluminación naturales, sombreado de superficies expuestas a la radiación solar durante los períodos cálidos y una envolvente de eficiencia energética. Las áreas funcionales se distribuyeron a lo largo de un eje este-oeste con áreas transparentes orientadas hacia el norte. El área de ganancia solar directa es del 7% con respecto al área útil del edificio. La transmitancia térmica es de 0,52 y 0,34 W/m² para paredes y techos, respectivamente. El monitoreo experimental muestra un ambiente térmicamente aceptable y un rendimiento energético adecuado, mientras que la simulación computacional, realizada con el programa SIMEDIF V2.0, permitió obtener un modelo termofísico del edificio que representa las mediciones realizadas.

Palabras claves: Edificio solar no-residencial, Monitoreo post-ocupación, Simulación, Calibración.

Abstract

This work describes the design of a solar building for INTA in Victorica, a city located in the province of La Pampa, Argentina (37°38'S, 63°34'W, 175 m above sea level). It is on the border between bioenvironmental zones IIIa and IVb, which according to

IRAM Standard 11603 correspond to areas of maximum irradiance. The objectives of this work are to analyze the hygrothermal and energetic behavior of the building in a period of spring-summer transition under conditions of use, evaluate the conditions of interior comfort and obtain a calibrated thermophysical model that allows to represent the building and use it in subsequent studies. The general design guidelines were: minimize conventional energy consumption in thermal lighting conditioning, use traditional technology, maximize visual and thermal comfort and achieve an additional cost of less than 10%. The design strategies were: direct solar gains to heat the building in winter, natural ventilation and lighting, shading of surfaces exposed to solar radiation during hot periods and an energy efficiency envelope. Functional areas were distributed along an east-west axis with transparent areas facing north. The area of direct solar gain is 7% with respect to the useful area of the building. The thermal transmittance is 0.52 and 0.34 W/m² for walls and ceilings, respectively. The experimental monitoring shows a thermally acceptable environment and an adequate energy efficiency, while the computational simulation, carried out with the SIMEDIF V2.0 program, allowed to obtain a thermophysical model of the building that represents its real behaviour.

Keywords: Non-residential solar building, Post-occupation monitoring, Simulation, Calibration

Introducción

Un gran número de variables de interacción aleatoria se combinan para dictar el rendimiento energético de un edificio (Royapoor y Roskilly, 2015). El comportamiento de los ocupantes es uno de los principales factores que influyen en el consumo de energía en el edificio y contribuyen a la incertidumbre en la predicción y simulación del uso de energía en edificios (Tianzhen Hong et al., 2016) y Fabi et al. (2012) dijeron que además de las propiedades de los edificios, los controles del edificio afectan el consumo de energía de los edificios y, algunos de ellos, están muy conectados con el comportamiento de sus ocupantes. Concluyeron que se debe hacer un esfuerzo significativo dirigido a comprender mejor la dinámica de la relación entre el comportamiento del ocupante y el consumo de energía precisa, confiable y realista en el interior, relación que sigue siendo un problema sin resolver. En este contexto, el comportamiento de los ocupantes, la realización final de la construcción, las instalaciones técnicas y el uso real de los sistemas operados por los ocupantes pueden tener grandes efectos en el consumo de energía y esto genera enormes brechas entre el rendimiento energético real y el previsto.

En este contexto, el modelo de construcción utilizado para nuestro estudio de caso es un edificio real que fue diseñado para ahorrar energía y alcanzar los niveles de satisfacción de los usuarios a través de su diseño bioclimático. Los objetivos de este trabajo son: - Analizar el comportamiento higrotérmico y energético del edificio a través del monitoreo entre el 17 de julio de 2017 y el 2 de febrero de 2018.

Localización y descripción del edificio

El caso de estudio se encuentra en Victorica, en el noroeste de la provincia de La Pampa, Argentina (37°38'S, 63°34'W, 175 m sobre el nivel del mar). Esta región seca se caracteriza por mesetas, valles, colinas y planicies de cultivo, tierras de pastoreo bajas y bosques abiertos. Se ubica en una situación de borde entre la zona bioambiental IIIa y IVb de máxima irradiación según Norma IRAM 11603 (2011). Los datos climáticos se muestran en la Tabla 1. La Norma recomienda para las localidades en situación de borde satisfacer la condición más desfavorable, por lo tanto se sugiere utilizar aislamiento térmico en toda la envolvente, evitar puentes térmicos y minimizar el riesgo de condensación en paredes y techos. Además, se recomienda una orientación NW-N-NE-E del edificio y ventilación cruzada. De acuerdo con Auliciens (1969) la temperatura de neutralidad de Julio es 20.3°C y la zona de confort oscilaría entre 17.8 y 22.8°C. Para Enero la temperatura de neutralidad es de 25.1°C y la zona de confort estaría definida por 22.6 y 27.6°C.

Las estrategias fueron:

- Orientación de los espacios según su uso para maximizar la radiación solar disponible.
- Minimización de la diferencia de temperatura del aire (zonificación térmica) entre áreas con y sin ganancias solares directas.
- Calefacción solar pasiva y conservación de energía en invierno mediante el uso de ganancia solar directa y una envolvente aislada para minimizar las pérdidas de calor.
- Enfriamiento pasivo en verano mediante el uso de ventilación cruzada natural, almacenamiento de masa térmica, sombreado y dispositivos para control solar.
- Reducción del consumo de electricidad para la iluminación mediante iluminación diurna y luminarias energéticamente eficientes.
- Diseño de los espacios exteriores: uso de árboles y plantas según la orientación del edificio.
- Usuarios: todos deben comprender cómo se debe utilizar el edificio para lograr el mínimo consumo de energía y por qué. Una guía de buenas prácticas y su compromiso sería una buena estrategia.

Tabla 1: Condiciones climáticas del lugar.

Anual	Temperatura media (°C)	Máxima	23.3
		Media	16.0
		Mínima	8.7
	Irradiación solar anual sobre superficie horizontal (MJ/m ²)		18.8
	Humedad relativa (%)		64
Temperatura media de Julio (°C)		Mínima	1.8
		Media	8.2
		Máxima	14.6
Temperatura de diseño de invierno (°C)			-7.6
Amplitud térmica de invierno (°C)			12.0
Temperatura absoluta mínima en Julio (°C)			-12.6
Velocidad media de viento en invierno (km/h)			11
Irradiación solar sobre superficie horizontal en Julio (MJ/m ²) [13]			8.1
Temperatura media de Enero (°C)		Máxima	31.5
		Media	23.6
		Mínima	15.7
Temperatura de diseño de verano (°C)			39.5
Amplitud térmica de verano (°C)			43.0
Temperatura máxima absoluta en Enero (°C)			39.5
Velocidad media de viento en verano (km/h)			11
Irradiación solar sobre superficie horizontal en Enero (MJ/m ²) [13]			23.4
Grados día de calefacción base 18°C			1505
Grados día de enfriamiento base 23°C			379

Fuente: Servicio Meteorológico Nacional – Fuerza Aérea Argentina (2000). Irradiación solar: Righini, H. Grossi Gallegos, C. Raichijk (2005).

El diseño del edificio se muestra en la Figura 1. Al este, cerca de la entrada y el camino de circulación peatonal, que es una continuación del área de la vereda, hay un espacio verde con especies nativas del bosque de pampas. La entrada al edificio se define como un área independiente con una puerta doble desde la cual las áreas funcionales se distribuyen a lo largo de un eje E-W. La oficina técnica y la sala de conferencias están orientadas hacia el norte y tienen acristalamiento transparente para obtener energía solar directa en invierno, con aleros y pérgolas de protección para el verano. La sala de usos múltiples (SUM) está destinada a actividades de entretenimiento y socialización, y está ubicada en el lado N-W, mirando hacia el norte. Esta área está conectada con el resto de las áreas del edificio (gestión-extensión-investigación) a través de una circulación de este a oeste. También se utiliza como garaje. La oficina del director está ubicada en el lado sur, con pequeñas ventanas que ayudan a la expansión visual y aseguran la iluminación natural indirecta que proviene del área de circulación y del plenum. El sector servicios se ubica al oeste de esta oficina. El área de captación solar (área de vidrio efectiva) es de alrededor del 7.0% del área útil del edificio. Un elemento clave en este diseño es el plenum técnico-térmico, que tiene ventanas que dan al ecuador. Este plenum está ubicado entre las áreas norte y sur, a una altura de 2.40 m sobre la circulación (Ver Figura 1). Esta área funciona como un sector de compensación de ganancia de almacenamiento de energía solar. El plenum, concebido como un 'volante térmico', calienta el área sur del edificio cuando las ventanas ubicadas entre ambas áreas están abiertas. Además, optimiza la ventilación cruzada natural durante el verano. Por lo tanto, el plenum permite la operación del edificio de acuerdo con

las diferentes estaciones. Esta estrategia se replica en el área de administración donde se pueden abrir ventanas altas desde una pasarela (continuación del plenum).

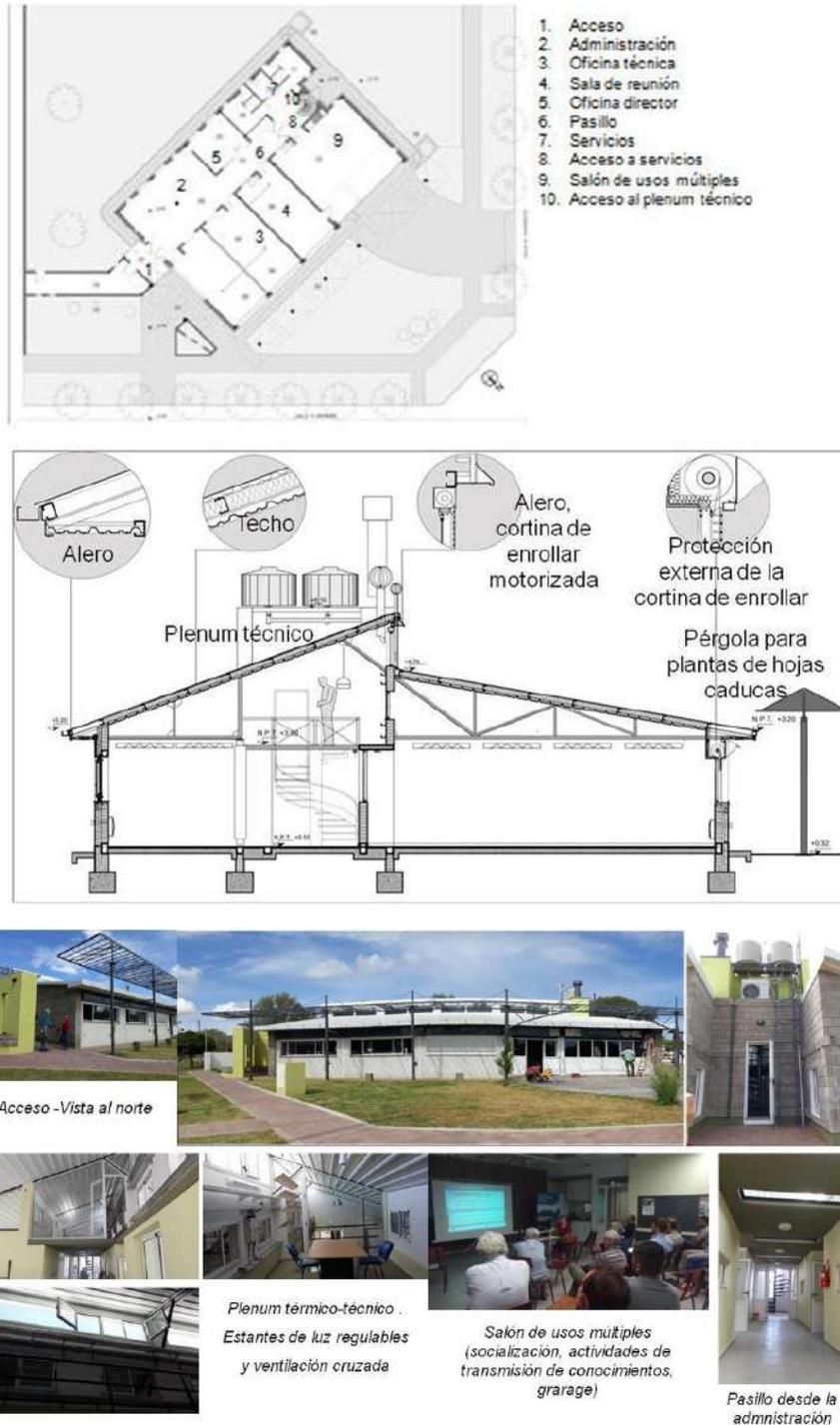


Figura 1: Vista y corte del edificio y algunas fotos del mismo.

La conservación y el almacenamiento de energía se logra a través de la tecnología del sobre. Las paredes son de tres capas: ladrillo macizo como masa térmica en la parte interior (0,17 m de espesor), aislamiento térmico de poliestireno expandido (0,05 m de espesor) y protección mecánica exterior (ladrillo sólido, 0,07 de espesor). Los techos inclinados están hechos de chapa prepintada blanca y espuma de poliuretano de 0,10 m de espesor con película de aluminio y aislamiento de fibra de vidrio de 0,1 m. Las puertas y ventanas están hechas de aluminio prepintado, puente térmico y pre-marco de madera dura. Las ventanas son de vidrio simple y tienen persianas mecánicas con listones ajustables. El edificio tiene un diseño compacto (Índice de Compacidad=95%) y un FAEP adecuado (1.61). Según Esteves et.al. (1997), un valor inferior a 2 se considera como un indicador de eficiencia energética en el diseño del edificio. El valor G (Coeficiente Volumétrico de Pérdidas) cumple con los requisitos de la Norma IRAM 11604, 2011. Como resultado de la envolvente vertical de las paredes de ladrillos macizos y del uso, también de de paredes interiores macizas, el edificio tiene alta inercia (400 kg / m²) (J. Goulding, J. Owen Lewis, T. Steemers, 1994). La figura 2 muestra imágenes de la vista norte del edificio y algunas áreas funcionales.

Metodología

Monitoreo y análisis

El monitoreo post-ocupación del edificio se realizó entre el 17 de julio de 2017 y el 5 de febrero de 2018). En el presente trabajo, se seleccionaron para el análisis dos periodos: uno en invierno (17 de julio al 31 de agosto) y uno en verano (21 de noviembre de 2017 al 2 de febrero de 2018).

Se instalaron registradores de datos HOBO en cada área funcional para detectar la temperatura interior y la humedad relativa en intervalos de tiempo de 10 min. Los registradores de datos estaban protegidos por contenedores térmicos de poliestireno expandido con orificios, de acuerdo con la metodología descrita por Molas et al. (2008). Las variables meteorológicas al aire libre (radiación solar, velocidad del viento, humedad relativa y temperatura ambiente exterior) fueron registradas por una estación meteorológica instalada cerca del edificio. Simultáneamente, se realizaron tres lecturas diarias de los medidores de gas natural y electricidad al comienzo, al mediodía y al final de la actividad diaria (período: 7:00 AM a 4:00 PM).

Por otra parte, para analizar el confort térmico se utilizó el diagrama psicrométrico, en donde se volcaron todos los valores de las mediciones realizadas en los periodos analizados.

Simulación computacional

La simulación del comportamiento de la planta se llevó a cabo mediante el software SIMEDIF V2.0 (SIMEDIF, 2019), que en su nueva versión cuenta con un módulo para simular fachadas verdes utilizando la metodología descrita en Flores Larsen et al. (2015). El programa SIMEDIF es una herramienta de diseño desarrollada en el INENCO (UNSa-CONICET) para calcular la temperatura horaria en los ambientes interiores de un edificio, la temperatura de las superficies de las paredes y la energía auxiliar de calefacción/refrigeración que se necesita para mantener los espacios a una dada temperatura y el nivel de confort térmico según ASHRAE55. Permite analizar su comportamiento frente a diferentes condiciones climáticas, detectar problemas de falta de confort (sobrecalentamiento o bajas temperaturas), evaluar las distintas alternativas constructivas durante la etapa de diseño, como por ejemplo variaciones en la geometría del mismo, orientación, ubicación y tamaño de áreas vidriadas, estructura y conformación de la envolvente, materiales y sistemas de acondicionamiento pasivos e híbridos a utilizar, etc.

Resultados

Resultados del monitoreo en el periodo de transición

El período de monitoreo se extiende desde el 1 al 21 de noviembre de 2017. Los días 11 y 12 marcan un cambio en los hábitos de uso del edificio en cuanto a la carga y descarga de energía para calefaccionar y refrescar el ambiente

interior. Se pasa de un período de alternancia de días de cielo claro y cielo cubierto a un período con predominancia de cielo diáfano con valores de irradiancia solar máxima sobre superficie horizontal entre 900 y 1000 W/m². En la primera parte del período en estudio la temperatura de las áreas funcionales de uso permanente oscilan entre los 20 y 25°C de mínima y máxima, respectivamente para una temperatura de neutralidad que oscilaría para noviembre entre los 21.4 y 26.4°C. Se observa un ascenso de la temperatura hacia el día 13 y 14/11 (lunes-martes) con valores que se acercan a los 27.0°C. Ambos días registran el encendido de aire acondicionado con un consumo de electricidad de 10 y 6 kWh entre las 7 y las 13h. El día 13 en la oficina se enciende el AA a las 14h con una temperatura interior de 27.5°C, 1.1°C por encima de la temperatura de neutralidad (26.4°C) hasta las 16h. En la oficina del director se enciende a la misma hora cuando la temperatura alcanza un valor de 27.1°C (0.7°C por encima de la temperatura de neutralidad) y se apaga a las 15h. El día 14 en la oficina del director el equipo se enciende a las 11h cuando, y durante 2 horas, y cuando la temperatura llega a los 25.8°C. En el inicio de la jornada laboral del día 15 se aprovecha el descenso de la temperatura exterior hasta los 17.6°C para refrescar todo el edificio con ventilación natural cruzada.

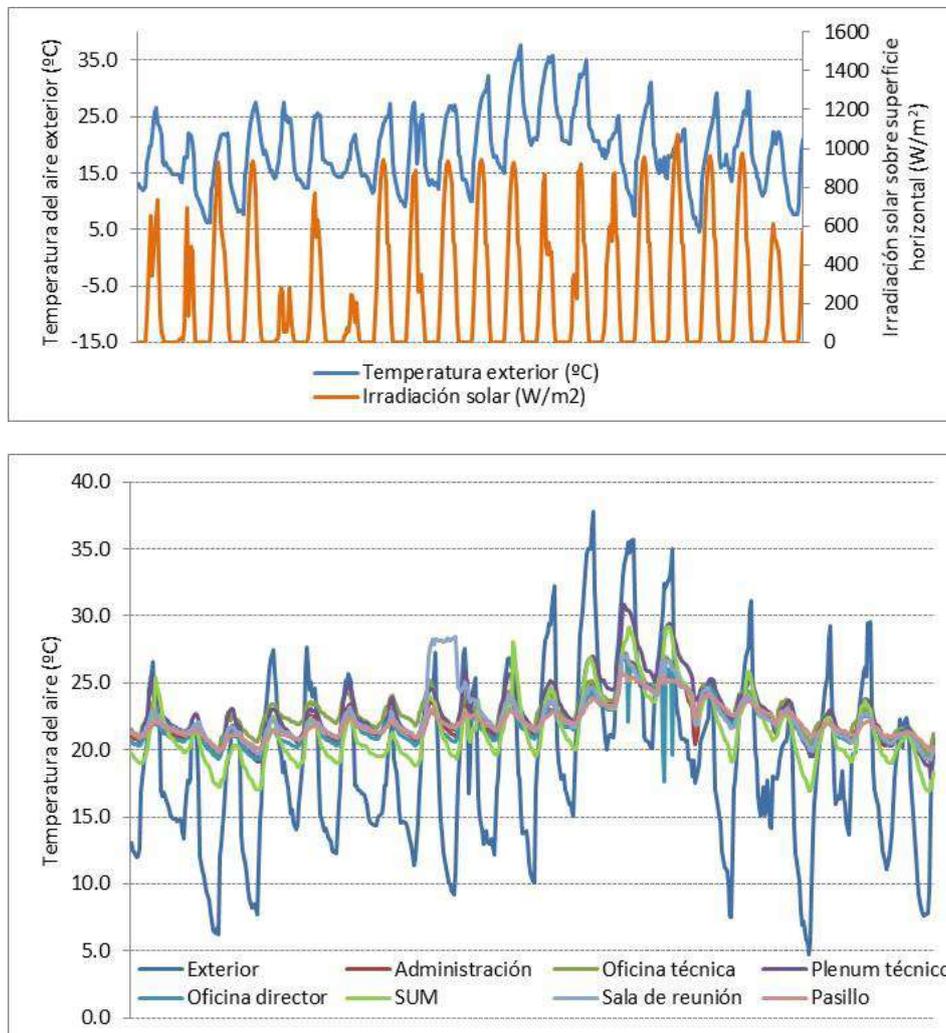


Fig. 2: Mediciones para el período de transición entre el 1 y el 21 de noviembre de 2017. Arriba: condiciones meteorológicas del período. Abajo: temperatura del aire en el interior del edificio.

Tabla 2: Temperatura promedio del aire interior y exterior entre el 1 y el 21 de Noviembre de 2017.

Periodo	Temperatura promedio del aire interior y exterior (°C)							
	Exterior	Administración	Oficina	Sala de Conferencias	Pasillo	Oficina del Director	Salón de usos múltiples	Plenotécnico
Entre el 1 y el 21 de Noviembre de 2017	19.1	22.2	22.7	22.5	22.1	21.9	21.4	22.9
En el periodo de uso (7AM a 4PM)	20.6	22.4	23.0	22.6	22.1	22.1	21.4	23.1

Tabla3: Consumo de gas natural (m³) durante el periodo de monitoreo

Periodo	Mañana (m ³)	Tarde (m ³)	m ³ /día	Noche(m ³)	Temperatura promedio entre las 8AM y las 4PM (°C)
17-20/10	1.7	2.3	3.9	3.5	21.3
Fin de semanaextendido	Consumo de gas natural total(m ³) = 5.9				
24-28/10	0.6	0.4	1.0	1.3	23.1
Fin de semana	Consumo de gas natural total(m ³) = 2.9				
31/10-03/11	s/d tri-diario completo		0.8	s/d	20.3
Fin de semana	Consumo de gas natural total(m ³) = s/d				
06-10/11	0.9	1.1	2.0	3.3	21.4
Fin de semana	Consumo de gas natural total(m ³) = 3.8				
13-17/11	0.4	0.2	0.6	0.6	24.6
Fin de semanaextendido	Consumo de gas natural total(m ³) = 4.1				
21-24/11	0.3	0.2	0.5	0.6	23.2
Fin de semana	Consumo de gas natural total(m ³) = 1.7				
27/11-01/12	0.3	0.1	0.4	0.4	23.0

En este marco se observa en la Tabla 2 que no se registra diferencia en la temperatura del aire interior entre los valores del período completo y en el período en condiciones reales de uso. Sólo hay 2 décimas de grado en el promedio de la temperatura interior, mientras que en el exterior es de 1.5°C. Se observa que el ΔT respecto al período julio-agosto desciende a 3.1°C (período diario completo) y 1.8°C (jornada laboral). Según la tabla 3 el promedio semanal del consumo diario y durante la noche de gas natural para cada semana laborable y fines de semana del período en análisis, hacia la semana del 13 al 17 desaparece el consumo durante el día y durante la noche. El ambiente exterior aumentó su temperatura, mientras que el interior alcanza valores compatibles con la temperatura de neutralidad. El edificio se comporta adecuadamente en el período de transición y los hábitos de uso fueron los apropiados, así según la figura 3 el comportamiento higrotérmico de la administración y de la oficina muestra un ambiente confortable

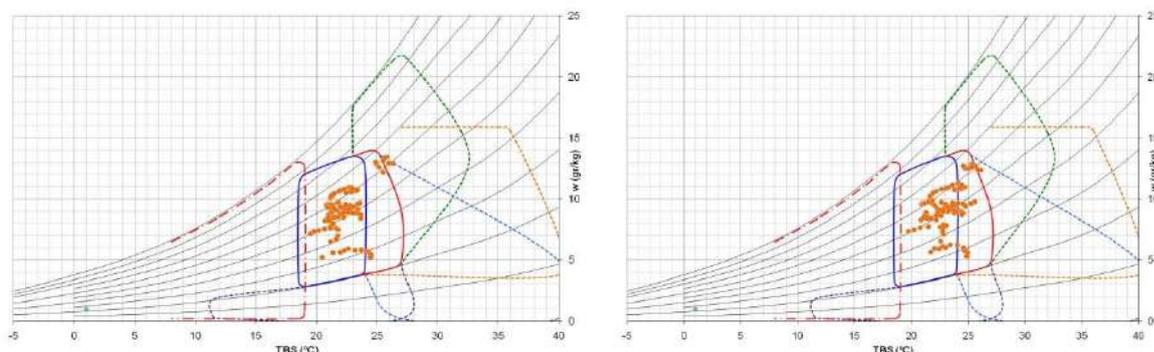


Fig. 3. Diagrama de confort para el periodo entre el 1 y el 21 de noviembre de 2017 en la Administración (izquierda) y la Oficina (derecha), en condiciones reales de uso

Resultados de la simulación con SIMEDIF

En esta etapa del trabajo convergen: - los datos que surgen del monitoreo y el registro detallado de la información provista por los usuarios. De suma importancia fueron las prestaciones del propio modelo de simulación que facilitó el ingreso de las cargas internas por período y por día de acuerdo a los horarios de uso del edificio, a saber de 8-13h, 8-16hs, 8-20h, 20-8h, posibilidad que se repite en el caso de las renovaciones, y que facilita la consideración de la ventilación nocturna. La Figura 11 muestra el periodo seleccionado y que se extiende entre el 1 y el 21/11/2017. Es un período caracterizado durante los primeros días por una alternancia de cielo claro y cubierto, con temperaturas máximas entre los 20 y 25°C y mínimas entre 5 y 15°C. El día 12 la temperatura exterior supera los 35°C. Hasta acá, hubo consumo de energía para calefaccionar algunas áreas funcionales: 2.0 y 3.3m³ durante el día y la noche, respectivamente (semana 6 al 10/11) (Tabla 3). A partir de la semana del día 13/11 el valor se reduce a 0.6 m³ tanto durante el día como a la noche.

La Figura 4 muestra los resultados de la calibración en cada área funcional. Se observa en la sala de reunión que le día 8, y a partir del fin de la jornada laboral el calefactor permaneció encendido al máximo durante la noche para acondicionar térmicamente el lugar por la permanencia de pollo bebe que la institución entrega a productores como parte de las tareas de extensión. A partir de un análisis de regresión lineal simple se estudia el grado de asociación entre los datos medidos y simulados.

Tabla 4: Correlación entre la temperatura del aire medida y simulada en las distintas áreas funcionales. Referencias: Correlación y (valor P).

Permanent use	Administration	0.9624; (0.0000)
	Office	0.9527; (0.0000)
	Director's office	0.8934; (0.0000)
Non-permanent use	Conference room	0.9417; (0.0000)
	Corridor	0.9589; (0.0000)
	Bath	0.9598; (0.0000)
	Multipurpose room	0.9599; (0.0000)
	Technical plenum	0.9598; (0.0000)

La Tabla 4 muestra las correlaciones de Pearson, entre los datos medidos y simulados. Los elevados coeficientes de correlación entre los datos demuestran una fuerte relación lineal en las distintas áreas funcionales. También se muestra, entre paréntesis, el valor-P que prueba la significancia estadística de las correlaciones estimadas. Todos los valores-P resultaron inferiores a 0.05, indicando correlaciones significativamente diferentes de cero, con un nivel de

confianza del 95.0%. Los resultados permiten ratificar la validez del modelo termo-físico del edificio, el cual será utilizado posteriormente para estudios de relocalización e influencia del cambio climático.

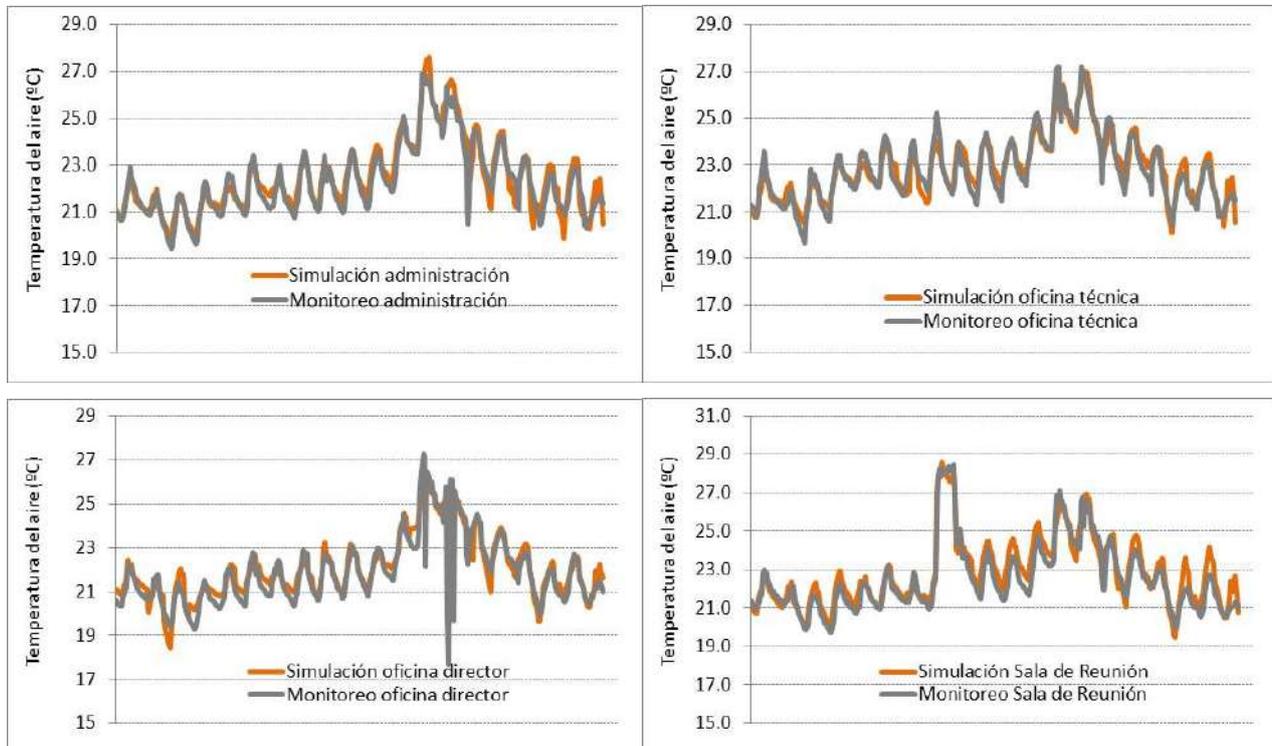


Figura4: Datos medidos y ajustados con SIMEDIF para el periodo comprendido entre el 1 y el 21 de noviembre de 2017.

Conclusiones

En acuerdo con los objetivos nuestras conclusiones son contundentes:

- Un edificio representa un sistema complejo con un alto nivel de interdependencia con factores exógenos y endógenos, situación que genera incertidumbre en las valoraciones y expectativas energéticas en la etapa de diseño.
- El ambiente interior de acuerdo al monitoreo del edificio es térmicamente aceptable en el periodo de transición.
- El software SIMEDIF fue una herramienta muy útil para describir el comportamiento térmico del edificio bajo condiciones reales de ocupación.
- La integración de una documentación técnica detallada del diseño del edificio, un seguimiento periódico del avance de la obra, la participación activa de los usuarios durante la etapa de monitoreo permitió acotar la brecha y minimizar la discrepancia entre datos medidos y simulados con valores de correlación estadísticamente significativos.
- La calibración y la obtención del modelo termo-físico del edificio permitirá evaluar, en futuros trabajos, el impacto de la práctica de las instituciones nacionales de implantar un mismo proyecto sin adecuación al clima de la localidad, el cual consideramos que debe ser erradicada de la gestión de la infraestructura edilicia.
- El compromiso del proyectista, de los investigadores y de los propios usuarios permitieron una transferencia de tecnología exitosa al sector público

Agradecimientos

Este trabajo fue parcialmente financiado por ANPCYT (PICT ANPCYT 2014-2605) y Universidad Nacional de Salta (CIUNSa 2489).

Referencias

- Auliciens, A., 1969 - "Effects of Weather on Indoor Thermal Comfort" Department of Geography, Whiteknights, University of Reading, Reading, Berks., England; Int. J. Biometeorology. , vol. 13, No. 2, pp. 147-162.
- Fabi V., Rune VintherAndersen , Stefano Corgnati, Bjarne W. Olesen. Occupants' window opening behaviour: A literature review of factors influencing occupant behaviour and models. Building and Environment 58 (2012) 188 -198.
- IRAM Norm 11604 (2011). Aislamiento térmico de edificios. Verificación de sus condiciones higrotérmicas. Ahorro de energía en calefacción. Coeficiente volumétrico G de pérdidas de calor. Cálculo y valores límites. Buenos Aires
- Righini R., H. Grossi Gallegos, C. Raichijk, Approach to drawing new global solar irradiation contour maps for Argentina, Renew. Energy 30 (2005)1241–1255.
- Royapoor M., Tony Roskilly. Building model calibration using energy and environmental data. Energy and Buildings 94 (2015) 109 -120.
- Servicio Meteorológico Nacional–Fuerza Aérea Argentina, 2000. Argentina.
- TianzhenHong, Sarah C. Taylor-Lange, Simona D'Oca, Da Yan, Stefano P. Corgnati. Advances in research and applications of energy-related occupant behavior in buildings. Energy and Buildings 116 (2016) 694 -702.