



SIMULACIÓN ENERGÉTICA PARAMÉTRICA. ANÁLISIS DE PARÁMETROS INFLUYENTES EN LAS CARGAS ENERGÉTICAS

Parametric energy simulation. Analysis of influential parameters in energy charges

M. Victoria Mercado (Autor principal / Autor de Contacto)

Filiación: Instituto de Ambiente Hábitat y Energía. INAHE, CCT Mza-CONICET

Dirección: Av. Ruiz Leal s/n°, Parque Gral San Martín. Ciudad de Mendoza, Mendoza, Argentina CP: 5500.

Correo: mvmercado@mendoza-conicet.gob.ar

Gustavo Barea Paci

Filiación: Instituto de Ambiente Hábitat y Energía. INAHE, CCT Mza-CONICET

Dirección: Av. Ruiz Leal s/n°, Parque Gral San Martín. Ciudad de Mendoza, Mendoza, Argentina CP: 5500.

Correo: gbarea@mendoza-conicet.gob.ar

Alfredo Esteves

Filiación: Instituto de Ambiente Hábitat y Energía. INAHE, CCT Mza-CONICET

Dirección: Av. Ruiz Leal s/n°, Parque Gral San Martín. Ciudad de Mendoza, Mendoza, Argentina CP: 5500.

Correo: aesteves@mendoza-conicet.gob.ar

Manuscript Code: 007

Date of Acceptance/Reception: 27-09-2018/24-08-2018

Resumen

Se han realizado numerosos estudios de la incidencia de diferentes variables de diseño bioclimático como la forma, la orientación, la calidad térmica de la envolvente, el nivel de aislación, entre otros, a partir de los cuales se han obtenido datos de la influencia de estos en el consumo energético. Sin embargo son pocos los estudios que apuntan a la relación entre ellos. Con el avance de las herramientas de simulación es posible evaluar estas variables combinadas entre sí, con la metodología paramétrica. El principal objetivo del trabajo es Evaluar la mejor combinación entre (forma, orientación y envolvente) para minimizar el consumo energético y ponderar la importancia de las variables estudiadas en el diseño del edificio. La metodología utilizada fue la simulación paramétrica realizada en tres etapas, 1. Establecer rangos de cada variable para el estudio paramétrico, 2. Seleccionar los periodos de simulación adecuados en base los archivos climáticos y, 3. Evaluar los resultados para obtener variables de sensibilidad de cada variable en estudio. A partir de los resultados obtenidos se realizó un estudio de sensibilidad de la influencia en el consumo energético de cada variable. Fue posible advertir la preponderancia de las mismas obtenida por el análisis de sensibilidad. Para la forma cuadrada: Orientación-Utecho-Umuros-WWR; para la forma rectangular: Orientación Utecho-WWR-Umuro y para la forma L: Orientación-Utecho-WWR-Umuro.

Palabras claves: Eficiencia energética, Simulación energética edilicia, Simulación paramétrica

Abstract

Several studies have been conducted on the incidence of different bioclimatic design variables such as shape, thermal orientation, thermal quality of the envelope, level of insulation, among others, from which data have been obtained of the influence of these on energy consumption. However, few studies point to the relationship between them. With the advance of the simulation tools it is possible to evaluate these variables combined with each other, with the parametric methodology. The main objective of the work is to evaluate the best combination between (form, orientation and envelope) to minimize energy consumption and to weigh the importance of the variables studied in the design of the building. The methodology used was the parametric simulation carried out in three stages, 1. Select the simulation periods based on the climatic archives and, 3. Evaluate the results to obtain the sensitivity variables of each variable under study. Based on the results obtained, a sensitivity study of the influence on the energy consumption of each variable was carried out. It was possible to notice the preponderance of the same results by the sensitivity analysis. For the square shape: Orientation-Utecho-Umuros-WWR; for the rectangular shape: Orientation Utecho-WWR-Umuro and for the L shape: Orientation-Utecho-WWR-Umuro.

Keywords: Energy efficiency, Building energy simulation, Parametric simulation

Introducción y Estado del arte del problema

Dado que los edificios son responsables de alrededor del 32% del gasto de la energía total (<https://www.iea.org/etp2017/>), se han desarrollado muchas iniciativas y políticas para construir edificios más eficientes. En la Unión Europea, todos los edificios nuevos deben ser construidos con "energía casi nula" antes del 31 de diciembre de 2020 (CE de la Unión Europea, 2012). Por ello las variables que influyen en el consumo energético de los edificios se están convirtiendo en una prioridad clave para la toma de decisiones a la hora del diseño.

Según Olgay, en las premisas de diseño bioclimático debe existir un proceso de análisis del ambiente, del clima, la biología humana, el equilibrio armónico de la obra, de los principios físicos y las técnicas para poder responder a la consigna de bienestar y confort de los habitantes. (Olgay, 1998).

Por lo tanto en las primeras etapas del diseño se deben contemplar una serie de medidas que tienen una gran influencia en el rendimiento del edificio. La forma, la orientación, la materialidad de la envolvente, la ocupación y el clima son algunas de las variables a tener en cuenta en la etapa inicial.

Estas decisiones de diseño, deben definirse en etapas tempranas, donde las herramientas de simulación de performance de edificios (BPS) no son útiles, ya que aún no se ha esbozado un proyecto arquitectónico terminado. Estas herramientas, rara vez, se utilizan en la etapa inicial del proyecto como método de evaluación debido a que el nivel de información es bajo y los cambios de diseño son variados. (Depecker, Menezo, Virgone & Lepers, 2011; Stevanović, 2013; Hoseini et al., 2013; Kristoffer et al., 2015).

Para ello es indispensable estudiar cómo se comportan las diferentes decisiones de proyecto con relación a la eficiencia energética de los edificios. Es por ello que una de las formas es realizar, mediante múltiples simulaciones, un análisis de sensibilidad de cada una de las variables.

Los métodos de análisis de sensibilidad para edificios, se aplican para estudiar la respuesta de un modelo a la variación de los datos de entrada (variables) con el fin de identificar el impacto en el consumo energético. Proporciona información valiosa sobre el modelo, como la comprensión de lo que está influyendo en los niveles los parámetros elegidos para su análisis y sus interacciones. Los métodos de análisis de sensibilidad tienen como objetivo identificar los parámetros más influyentes en el consumo energético, en este caso.

Saltelli clasificó diferentes enfoques de análisis de sensibilidad (Saltelli, 2010):

Método local: donde un parámetro varía a la vez, mientras uno se establece fijo.

Método global: se usa para cuantificar la influencia de los parámetros en todo su rango de variación, y determinar su impacto en el resultado, ordenándolos por su nivel de importancia.

Método de detección: donde se busca cubrir todo el espacio de entrada para determinar las variables más influyentes cualitativamente.

Para este estudio se ha utilizado el método local y los objetivos del trabajo son a. Evaluar la mejor combinación entre (forma, orientación y envolvente) para minimizar el consumo energético y ponderar la importancia de las variables estudiadas en el diseño de un edificio bioclimático y, b. Jerarquizar cada variable en relación a la forma para efectivizar el desempeño energético del edificio.

Se han realizado diversos estudios de la incidencia de las variables mencionadas como la forma, la orientación, la calidad térmica de la envolvente, la relación entre envoltete translúcida y opaca entre otros, a partir de los cuales se han obtenido datos de la influencia de estos en el consumo energético (Gasparella et al., 2011; Hachem, Athienitis & Fazio, 2011; Hachem, Athienitis & Fazio, 2012; Loonen, Trčka, Cóstola & Hensen, 2013; Tuhus-Dubrow & Krarti, 2010). Sin embargo son pocos los estudios que apuntan a las relaciones entre ellas. Con el avance de las herramientas de simulación es posible evaluar estas variables combinadas entre sí, por medio de la metodología paramétrica. De esta manera es posible obtener la influencia que tienen sobre el desempeño energético edilicio en relación a la forma.

En el presente estudio se aborda el análisis de las siguientes variables: la forma, la orientación, la calidad térmica de la envolvente y la relación de envolvente (opaca y translúcida) para la situación de una vivienda de índole social. Se establece una única variable constante, la superficie en 80m². El estudio de estas variables se realizó en un clima Templado frío de la Argentina sumando un total de 768 simulaciones.

Metodología

EL avance en programas de simulación computacional permite la evaluación simultánea de numerosas variables y la interrelación entre ellas, que anteriormente suponían trabajos extensos y difíciles de realizar. La metodología paramétrica es un método exhaustivo que otorga la posibilidad de crear pautas de diseño bioclimático considerando varias estrategias a la vez. Samuelson et al., afirman que *las simulaciones tradicionalmente utilizadas en la industria de la construcción requieren entradas detalladas y, por lo tanto, son difíciles de emplear en las primeras etapas de diseño cuando el ritmo de la iteración de diseño es rápido y las entradas de simulación incluyen muchas variables desconocidas* (Samuelson et al., 2016).

El estudio se realizó con el software Energy Plus (version 8.9.0, 2018), por tratarse de una herramienta de simulación que permite un proceso cíclico y continuo con el proceso de diseño. Este programa ha sido desarrollado por el Departamento de Energía de EE.UU.

La metodología se estableció en 3 etapas:

1. Constituir rangos de cada variable para el estudio paramétrico,
2. Seleccionar de termostatos y localización climática,
3. Evaluar los resultados para obtener variables de sensibilidad y las diferentes ponderancias de cada variable.

1. Rangos de cada variable para el estudio paramétrico

Forma: Se consideraron tres formas diferentes que cubrieran la misma superficie de piso, 80m². Las formas presentan diferentes tipos de resolución, llenando desde una tipología compacta a una tipología abierta. Como tipología compacta se opta por un edificio cuadrado, donde la relación ancho-largo es 1 a 1, una composición rectangular con una relación de 1 a 2, y la tipología abierta en forma de L con una relación de 1 a b por tratarse de una respuesta frecuentemente utilizada como respuesta a lotes con predominancia rectangular.

Relación vidrio-envolvente opaca (WWR%): 20%-40%-60%-80%. El porcentaje de vidrio sobre envolvente opaca se distribuye de forma equivalente en todas las fachadas.

Orientación: Se rota el edificio en 0°-45°-90°-135°, con relación al Norte en sentido horario.

Calidad térmica de la envolvente: Para el análisis de la calidad térmica de la envolvente, se toma como referencia la norma IRAM 11605 de Argentina, "Acondicionamiento térmico. Condiciones de habitabilidad en Viviendas". Esta norma establece diferentes niveles de transmitancia que corresponden a un grado decreciente de calidad térmica, siendo: Nivel A: Recomendado, Nivel B: Medio y Nivel C: Mínimo. Para este punto se considera el sistema de construcción tradicional y másico, siendo para muros: ladrillo cerámico masiso, revoque en ambos lados y aislación; y para techos: Losa de hormigón alivianada, mortero para pendiente, membrana asfáltica y aislación. Para poder obtener la variabilidad de los paquetes constructivos de acuerdo a los valores de transmitancia requeridos por la norma se modifica los espesores de aislación térmica, considerando para el estudio la utilización de poliestireno expandido.

En un trabajo de los autores (Mercado & Esteves, 2005), se advirtió la necesidad de incorporar un nivel intermedio entre el nivel A y el nivel B, dado que el primero requiere la incorporación de aislación térmica en espesores importantes e injustificados desde el punto de vista térmico, práctico y económico. Este nivel propuesto también se tiene en cuenta.

En la tabla 1, se presentan las variables utilizadas para el presente estudio.

Tabla 1. Variables consideradas para las simulaciones paramétricas.

FORMA			ORIENTACIÓN				U TECHOS (IRAM 11605 + Nivel propuesto) [W/°K m ²]				U MUROS (IRAM 11605 + Nivel propuesto) [W/°K m ²]				WWR				
							Nivel A	Nivel B	Nivel C	Recom.	Nivel A	Nivel B	Nivel C	Recom.					
			0°	45°	90°	135°													
Superficie Expuesta [m ²]							0.36	0.99	1.75	0.68	0.31	0.80	1.00	0.56	20%	40%	60%	80%	
173.08	177.24	187.69																	

2. Termostato y zona climática

Dado que el objetivo principal del trabajo es el análisis del consumo energético de edificios, se considera propicio trabajar con el archivo climático anual. Además con el propósito de acceder a los valores de requerimiento energético para calefacción y para refrigeración se establecieron termostatos relacionados a los parámetros de confort de Olgyay. Para invierno se fijó en 20°C y para verano 24°C.

3. Sensibilidad cada variable.

El análisis de sensibilidad permite examinar cómo el cambio en una variable afecta al resultado. En este trabajo la evaluación del requerimiento energético será sensible a las variaciones de los parámetros.

En el diseño arquitectónico la "Forma", responde a limitaciones proyectuales y contextuales inmediatas donde se implantará el hecho constructivo, por lo tanto, a esta variable se la denomina como una variable independiente (tres

casos de forma: cuadrada, rectangular y en L). Los demás parámetros (Orientación, WWR y U) serán variables dependientes (ver tabla 1).

Se utilizó la siguiente expresión para el cálculo:

$$\text{Sensibilidad} = \frac{X_{\text{peor}} - X_{\text{mejor}}}{X_{\text{peor}}} * 100\% \quad (1)$$

Con dichos resultados, se realizó el análisis de requerimiento energético total (RE) y luego desgregado en relación a la demanda de calefacción y de refrigeración.

Por último se presentan los casos de mayor y menor consumo (desempeño energético) de las diferentes combinaciones paramétricas simuladas (768 casos simulados).

Resultados

Como se presentó en la metodología se realizó el análisis de sensibilidad para cada forma de estudio, los resultados se presentan en la Figura 1. De esta figura es posible advertir que la orientación marca una importancia relevante para cualquier tipo de forma que se utilice en la resolución edilicia, siendo la que presenta mayor porcentaje de influencia en el requerimiento energético. Sin embargo, la relación de participación de las demás variables es diferente en las distintas formas.

Para la forma cuadrada, la toma de decisiones es gobernada por la orientación, seguida de la definición de transmitancia del techo, muro y por último la cantidad de abertura que tenga el edificio por fachada. Esto se considera razonable al considerar que existe una misma cantidad en m² de aberturas por fachada en un edificio con iguales dimensiones de fachadas.

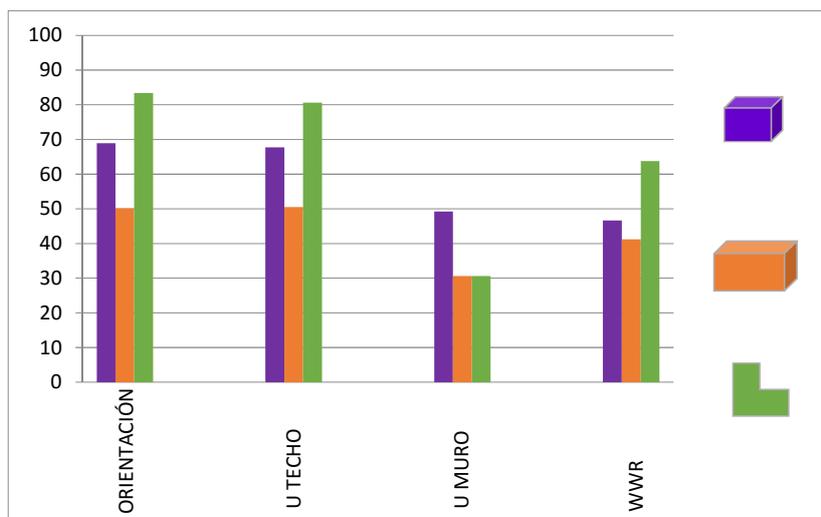


Figura 1. Análisis de Sensibilidad de las variables de estudio para cada tipología formal. Fuente: elaboración propia.

En la misma figura, se advierte también, que las decisiones de la resolución material de techos sostienen un grado de predominio similar para todas las formas. Por lo tanto esto indicaría que la orientación y el UTechos son las primeras variables que se deben atender en la resolución proyectual.

En las dos variables restantes (materialidad de muro-UMuro- y cantidad de vidrio sobre las fachadas –WWR-) se presenta una diferencia en la tendencia de sensibilidad, la forma cuadrada muestra más relevante el UMuro sobre el WWR, mientras que, las formas rectangular y en L, se invierte su predominio. El impacto de variabilidad frente al cambio de los valores de estas se modifica cuando la resolución formal comienza a perder compacidad.

Se continúa el estudio con el análisis del (RE) para cada forma. En la figura 2 se presenta un diagrama de caja para el RE total. Posteriormente, en la figura 3, se discrimina el requerimiento energético para calefacción (REc) y el requerimiento energético para refrigeración (REr).

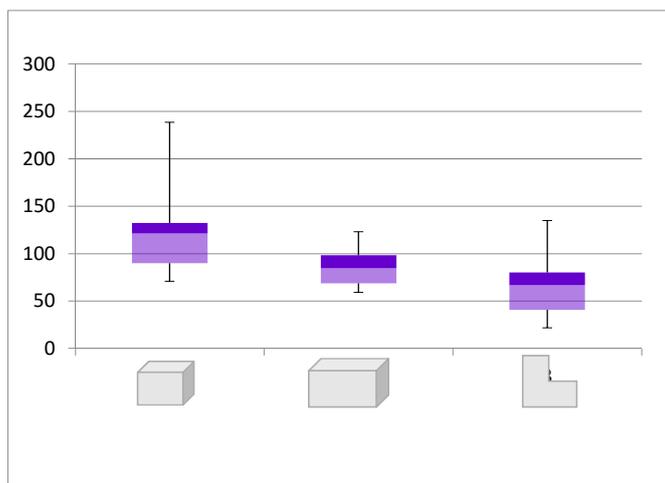


Figura 2. Diagrama de caja del requerimiento energético según la forma.

En la figura 2 es posible apreciar la diferencia de rangos del RE para las distintas formas edilicias. Si bien el rango es sustancialmente menor para la forma prismática rectangular, se advierte que la media y los cuartiles 2 y 3 son menores en la forma L, lo que supone un mejor comportamiento energético de este último. Sin embargo, al igual que el rango para la forma prismática cuadrada, la dispersión de los datos evidencia que las variables de orientación, UTecho, UMuro y WWR, poseen mayor incidencia en el mejor o peor desempeño energético del edificio.

Por el contrario para la forma rectangular las variables de diseño contempladas en el presente estudio, pueden hacer oscilar el RE hasta 43% menos que la variación que pueden significar para la forma cuadrada.

De este tipo de diagramas es posible advertir la dispersión de los datos máximos y mínimos del RE. En la forma cuadrada los valores de RE mayores se encuentran en una franja de disgregación mayor que para el caso de la forma rectangular, mientras que para los RE mínimos se encuentran concentrados en un rango menor para todas las formas. Esto supone que los valores o acciones que propician una mejora en el consumo energético se encuentran acotadas a un grupo reducido que se podrá observar detectando los mejores casos para cada forma (Tabla 3).

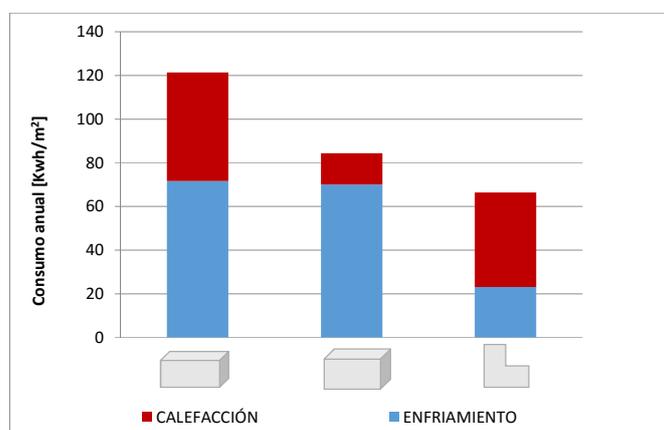


Figure 3. Requerimiento energético para calefacción y para refrigeración.

La figura 3 muestra la diferencia entre el RE_c y el RE_r para cada forma en kWh/m². El mayor consumo para ambas situaciones se presenta para la forma cuadrada, para las otras dos formas la diferencia entre los consumos de cada requerimiento es sustancial. Mientras que la forma rectangular presenta una disminución significativa del RE_c en relación a la forma cuadrada, el RE_r es similar, lo que implica una mayor exposición de las fachadas a la incidencia de la radiación solar. En cambio, en la forma en L, el RE_r es hasta un 60% menor que para la forma cuadrada lo que supone que las aberturas se encuentran más protegidas. Así mismo se evidencia una falta de esta en la época de calefacción lo que eleva el RE_c a niveles semejantes a la forma cuadrada.

En la Tabla 3, se muestran los casos con mejor y peor desempeño energético total, de calefacción y de refrigeración del análisis de los 768 casos de interrelaciones entre las variables analizadas.

Tabla 2. Casos de mejor y peor combinación para calefacción y enfriamiento por forma.

			
ENFRIAMIENTO	Caso	Caso	Caso
mejor	θ: 45°; UT: 0.36; UM: 0.31; WWR: 20%	θ: 0°; UT: 0.36; UM: 0.31; WWR: 40%	θ: 0°; UT: 0.36; UM: 0.31; WWR: 20
peor	θ: 135°; UT: 1.75; UM: 1.00; WWR: 40%	θ: 135°; UT: 1.75; UM: 1.00; WWR: 80%	θ: 45°; UT: 1.75; UM: 1.00; WWR: 80
CALEFACCIÓN	Caso	Caso	Caso
mejor	θ: 0°; UT: 0.36; UM: 0.31; WWR: 40%	θ: 0°; UT: 0.36; UM: 0.31; WWR: 20%	θ: 0°/90°; UT: 0.36; UM: 0.31; WWR: 20
peor	θ: 135°; UT: 1.75; UM: 1.00; WWR: 20%	θ: 90°; UT: 1.75; UM: 1.00; WWR: 80%	θ: 45°; UT: 1.75; UM: 1.00; WWR: 80
TOTAL	Caso	Caso	Caso
mejor	θ: 0°; UT: 0.36; UM: 0.31; WWR: 60%	θ: 0°; UT: 0.36; UM: 0.31; WWR: 20	θ: 0°/90°; UT: 0.36; UM: 0.31; WWR: 20
peor	θ: 135°; UT: 1.75; UM: 1.00; WWR: 40%	θ: 90°; UT: 1.75; UM: 1.00; WWR: 80	θ: 45°; UT: 1.75; UM: 1.00; WWR: 80

Los casos de mejor desempeño en calefacción y en refrigeración no son los mismos debido que si bien una conjunción de variables posibilita el consumo 0 para una estación, ese mismo requerirá consumo energético en la estación opuesta.

El coeficiente de transmitancia (U) en techos y muros, se observa como un factor común. Los niveles de menor consumo responden al coeficiente U dado para el Nivel A de la Norma IRAM 11605. Para un RE alto se advierte que la propiedad U de techos y muros se sitúa en un rango alto que supone la falta de aislación térmica en los paquetes constructivos. Se denomina factor común debido a que para los casos de calefacción, enfriamiento y el análisis total el resultado es el mismo.

Se considera importante advertir que existe un rango de diferencia de 3 y 8% entre los casos de mejor desempeño optando por el nivel A y el nivel recomendado para la transmitancia de techos y muros. Esto supone que por una reducción de la inversión de hasta el 50% en aislar techos y muros es factible obtener rendimientos energéticos muy similares a los mostrados en este trabajo como los mejores. Esto ya se preveía en un trabajo anterior (Mercado y Esteves, 2005).

El WWR y la orientación varían sustancialmente entre los casos de formas y para los REc y REr.

Para la variable de WWR, las formas menos compactas, rectangular y L, presentan una marcada diferencia entre los casos de mejor y peor desempeño para ambas situaciones (calefacción y enfriamiento). Para la condición de enfriamiento, se enfatiza la necesidad de reducir las aberturas por fachada, el 85% de los casos presenta el mejor desempeño con un WWR= 20%, mientras que el 15% admite hasta un WWR=40%. En los casos de peor desempeño energético para todos los escenarios (enfriamiento, calefacción y total), la relación WWR es del 80%.

La forma cuadrada presenta un comportamiento particular, se advierte que es inverso para el REc en relación al REr. Sin embargo cuando se considera el RE total se prioriza un alto porcentaje como mejor desempeño siendo el WWR= 60%.

En relación a la orientación, los patrones mejores y peores son similares entre formas. Como se asumía de acuerdo a la bibliografía consultada, las formas en general poseen mal comportamiento energético cuando sus caras no se orientan francamente al norte. Esto se considera como consecuencia de un ingreso de la ganancia solar directa. En la forma cuadrada esto se produce cuando se gira en ángulos de 45° y 135°, por la reducción de la cantidad de superficie transparente expuesta de forma directa a la radiación solar. Para la forma rectangular, la situación es similar cuando la forma gira y queda su lado menor. Al igual que las otras formas, la forma L muestra la disposición del mejor o peor caso en relación a su orientación, cuando la forma gira y sus fachadas poseen menos exposición solar, el ER sube; por el contrario cuando las fachadas se orientan de forma franca al Norte (por tratarse del Hemisferio Sur) el ER es menor.

Discusión y Conclusiones

El estudio realizado asevera la importancia de las primeras decisiones adoptadas en el proyecto de arquitectura en relación al requerimiento energético del mismo.

El estudio de sensibilidad, utilizando como variable independiente la forma, arrojó datos de importancia para la toma de decisiones del proyectista, pudiendo proporcionar un mapa de referencia de cuáles son las decisiones que se deben considerar en el comienzo de un proyecto arquitectónico.

Este análisis demostró que cuando la forma es algo ya determinado, la variable más influyente en el consumo energético del edificio es la orientación. Cuando se trabaja sobre un edificio donde las dimensiones de las fachadas son similares esta es menor, sin embargo cuando el edificio comienza a variar sustantivamente las dimensiones de sus fachadas este parámetro cobra mayor relevancia.

En relación a la composición de su envolvente traducido al coeficiente de transmitancia U , la relación es directa, a menor U en techos y muros, menor es el requerimiento energético (ER) para todas las formas. Se observó también, que la relación de consumo entre los niveles de transmitancia propuestos por el Nivel A de la Norma IRAM 11605 y el nivel recomendado alcanza una diferencia mínima del ER, siendo de hasta el 8% menor con un costo de aplicación del 50%.

La relación de fachada transparente y opaca (WWR) en el análisis de sensibilidad resulta ser el de menor influencia. Sin embargo se considera importante destacar que el uso excesivo de la abertura como recurso arquitectónico derivará directamente en un mayor consumo energético. Para formas más compactas el tratamiento de superficies transparentes permite elevar por encima del 20% el porcentaje de abertura sobre muros, pero para formas más abiertas este valor se reduce al 20% considerándolo óptimo. Respondiendo al objetivo dos de este trabajo, se considera que la jerarquización de las variables debe responder a la preponderancia de las mismas obtenida por el análisis de sensibilidad. Para la forma cuadrada: Orientación-Utecho-Umuros-WWR; para la forma rectangular: Orientación Utecho-WWR-Umuro y para la forma L: Orientación-Utecho-WWR-Umuro. Entonces la variable preponderante será la orientación, mientras que el coeficiente U y la relación WWR variará de acuerdo a la forma. Por último se considera continuar con el trabajo en otras zonas bioambientales de la República Argentina y de esta manera se completará el estudio para climas: Cálido, Templado Cálido y Frío.

Referencias

- Agencia Internacional de Energía (AIE). (2012). World Energy Outlook. Paris, Agencia Internacional de Energía (AIE).
- AmirHosein, G., Nur, D. D., Umberto, B., Ali, G., Nastaran & M., Mahdiar, G. (2013). Sustainable energy performances of green buildings: A review of current theories, implementations and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 1-17. ISSN 1364-0321. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.010>.
- Andrea, G., Giovanni, P., Francesca, C., Piercarlo, R. & Paolo, B. (2011). Analysis and modelling of window and glazing systems energy performance for a well insulated residential building. *Energy and Buildings*, 43, 1030-1037. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.032>.
- Attia, S., Gratia, E., De Herde, A. & Hensen, J. L. M. (2012). Simulation-based decision support tool for early stages of zero-energy building design. *Energy and Buildings*, 49, 2-15. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.01.028>.
- CE de la Unión Europea (2012). Directrices que acompañan a la regulación delegada de la Comisión (UE), no. 244/2012. *J. Eur. Comm.* [En línea]. Disponible en [http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:52012XC0419\(02\)](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:52012XC0419(02))
- Depecker, P., Menezes, C., Virgone, J. & Lepers, S. (2011). Design of buildings shape and energetic consumption. *Building and Environment*, 46, 627-635. ISSN 0360-1323, [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(00\)00044-5](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(00)00044-5).
- Hachem, C., Athienitis, A. & Fazio, P. (2011). Parametric investigation of geometric form effects on solar potential of housing units. *Solar Energy*, 85, 1864-1877. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.04.027>.
- Hachem, C., Athienitis, A. & Fazio, P. (2012). Evaluation of energy supply and demand in solar neighborhood. *Energy and Buildings*, 49, 335-347. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.021>.
- Loonen, R. C. G. M., Trčka, M., Cóstola, D. & Hensen, J. L. M. (2013). Climate adaptive building shells: State-of-the-art and future challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 483-493. ISSN 1364-0321. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.04.016>.
- Negendahl, K. & Nielsen, T. R. (2015). Building energy optimization in the early design stages: A simplified method. *Energy and Buildings*, 105, 88-99. ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.087>.
- Nembrini, J., Samberger, S. & Labelle, G. (2014). Parametric scripting for early design performance simulation. *Energy and Buildings*, 68, 786-798. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.09.044>.
- Olgyay, V. (1998). *Arquitectura y clima: manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas*. Barcelona, Gustavo Gili.
- Saltelli, A. & Chan, K. (2010). *Sensitivity analysis*. In *Wiley Series in Probability and Statistics* (2nd edition). John Wiley & Sons, Inc.
- Samuelson, H., Clausnitzer, S., Goyal, A., Chen, Y. & Romo-Castillo, A. (2016). Parametric energy simulation in early design: High-rise residential buildings in urban contexts. *Building and Environment*, 101, 19-31. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.02.018>.
- Stevanović, S. (2013). Optimization of passive solar design strategies: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 177-196. ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.04.028>.
- Tuhus-Dubrow, D. & Krarti, M. (2010). Genetic-algorithm based approach to optimize building envelope design for residential buildings. *Building and Environment*, 45, 1574-1581. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.01.005>.