

05-012

ANALYSIS OF ANNUAL HEATING AND COOLING ENERGY REQUIREMENTS FOR RESIDENTIAL BUILDINGS IN HOT CLIMATES IN MEXICO

Castelán, Jose Arturo; Aparicio-Fernández, Carolina; Ferrer-Gisbert, Pablo; Vivancos
Bono, Jose Luis
Universitat Politècnica de València

A great amount of world energy demand is connected to the built environment. Energy use attributed to residential buildings makes up nearly 16% of the total energy consumption in Mexico. This makes residential buildings the third largest energy end user in the country, only behind the transportation and industrial sectors. In the presented paper, the interactions between different conditions, of a housing project type in the hot climatic zones in Mexico – hot humid, hot sub humid and hot dry – through building energy simulation program has been evaluated. The dynamic simulations were carried out with TRNSYS software a dynamic simulation software to estimate the annual heating and cooling demand. The effect of the parameters like the climatic conditions in 6 locations (Cancun, Veracruz, Acapulco, Tapachula, Chihuahua, and Monterrey), insulation and thermal mass, aspect ratio, window systems including window area and glazing system, ventilation rates and different outdoor air control strategies on annual building energy requirements is examined and the results are presented for each city.

Keywords: *Housing type; Energy demand; Hot Climate; Energy efficiency; Simulation*

ANÁLISIS DE LOS REQUERIMIENTOS ANUALES DE CALEFACCIÓN Y REFRIGERACIÓN PARA EDIFICIOS RESIDENCIALES EN CLIMAS CÁLIDOS EN MÉXICO.

Una gran cantidad de la demanda mundial de energía está relacionada con el entorno construido. El uso de energía atribuido a la edificación residencial constituye casi el 16% del consumo total de energía en México, lo que provoca que dicho sector sea el tercer mayor consumidor de energía final del país, sólo por detrás del transporte y el sector industrial. En el trabajo presentado se han evaluado las interacciones entre las diferentes condiciones de una vivienda tipo, en zonas climáticas cálidas en México – climas cálido húmedo, cálido subhúmedo y cálido seco–, a través de un programa de simulación energética. Las simulaciones en el transitorio se llevaron a cabo con el software TRNSYS, un software dinámico de simulación para estimar la demanda anual de calefacción y refrigeración. Se ha analizado el efecto de distintos parámetros como el aislamiento y masa térmica de los cerramientos, la relación de aspecto, el acristalamiento (incluyendo el área de la ventana y el sistema de acristalamiento), las renovaciones en la ventilación y las diferentes estrategias de control del aire exterior. Para las condiciones climáticas de cada ciudad analizada (Cancún, Veracruz, Acapulco, Tapachula, Chihuahua y Monterrey) se presentan los requerimientos anuales de energía de la vivienda.

Palabras clave: *Viviendas tipo; Demanda energética; Clima Cálido; Eficiencia energética; Simulación*

Correspondencia: Jose Luis Vivancos Bono jvivanco@dpi.upv.es

1. Introducción

El sector de la edificación supone casi un tercio de la energía final consumida y se manejan previsiones de crecimiento de entorno al 50% en los próximos 35 años. El subsector de edificación residencial por su parte, representa un consumo de alrededor de tres cuartas partes del total (International Energy Agency, 2013).

El clima de un país tiene una gran influencia en sus patrones de consume energético. Debido a su ubicación geográfica y su relieve, México posee una gran diversidad climática. Dos terceras partes del país se consideran áridas o semiáridas mientras que el sureste es húmedo. Además, más de la mitad de la población reside en cotas superiores a los 1500 m. Debido a esta diversidad y, como continuación de nuestros trabajos en relación con mejoras energéticas en viviendas tipo en México (Castelán, Aparicio, Vivancos, 2014), en este artículo se analiza la influencia de las distintas variables en el diseño de una vivienda en seis ciudades de México, caracterizadas por tener clima cálido (Acapulco, Veracruz, Monterrey, Tapachula, Cancún y Chihuahua).

Aunque muchas viviendas con niveles socioeconómicos bajos no cuentan con aire acondicionado, esto reduce la calidad de vida de sus habitantes. Por otra parte, el estándar de vivienda social mexicana de los últimos años es la vivienda aislada o adosada, excluyente de los beneficios de la arquitectura bioclimática, con escaso empleo de materiales aislantes apropiados (Fundación IDEA, 2013).

La Agencia Internacional de la Energía preconiza para su escenario más razonable, una disminución de la intensidad energética para el sector residencial mexicano de más del 40% lo que implica, lógicamente, importantes esfuerzos en ahorro energético (International Energy Agency, 2013).

Ante esta situación se han desarrollado algunas estrategias fundamentalmente encaminadas a la adopción de medidas sustentables dentro de las viviendas de interés social: promoción de viviendas más eficientes, desarrollo de sistemas de evaluación de la eficiencia energética, incipiente desarrollo de legislación y normativa, etc. Así, por ejemplo, la Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI) publicó en 2010 la segunda edición del "Código de Edificación de Vivienda" que incluye un capítulo de "Sustentabilidad", aunque no tiene carácter vinculatorio.

La Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE) por su parte, ha publicado hasta la fecha 13 normas obligatorias relacionadas con las viviendas y celebra foros de intercambio de experiencias e investigaciones. Destaca fundamentalmente la norma NOM-020-ENER-2011, que establece las condiciones mínimas de eficiencia de la envolvente de la vivienda y permite reducciones en el consumo de energía utilizado por aire acondicionado y aparatos de calefacción.

Por supuesto, las características de los propios electrodomésticos influyen en el consumo energético. En un interesante estudio (Rosas-Flores J.A., Rosas-Flores D., Morillón D, 2011) se concluye que los dos electrodomésticos más consumidores de energía son el frigorífico y el aire acondicionado, de manera que las normas y los programas públicos de incentivos para la renovación de estos aparatos supondrían un gran potencial de ahorro de energía y emisiones de CO₂.

También a nivel científico se han realizado esfuerzos en el país. Relacionamos algunas de las publicaciones más relevantes de los últimos años.

Solís (2010) realiza un estudio térmico mediante DesignBuilder de seis viviendas económicas de 30 m² en clima cálido-seco. Y concluye que la orientación del conjunto de

viviendas pareadas afecta sensiblemente a la necesidad de enfriamiento y que el sombreado solo resulta eficiente si es total (no solo mediante aleros y persianas).

Posteriormente Griego, Krarti y Hernández Guerrero (2012) plantean una serie de recomendaciones para optimizar la eficiencia energética y el confort térmico para viviendas en la ciudad mexicana de Salamanca. Argumentan que, aunque se han desarrollado las primeras normativas, siguen siendo en su mayor parte recomendaciones voluntarias poco detalladas y no muy consistentes con las diversas zonas climáticas mexicanas. Es por ello que se hace necesario un enfoque integral en la búsqueda de las mejores soluciones posibles. Concluyen, como se ratifica en los resultados de este artículo, que se debería hacer un mayor esfuerzo en implementar unos mínimos niveles de aislamiento. Además, algunas de las recomendaciones normativas (p.ej. acabados oscuros) podrían incluso incrementar el consumo o disminuir el confort.

Romero et al. (2013) por su parte analizan 21 prototipos de viviendas para personas de bajos recursos en la ciudad de Mexicali (clima cálido-seco), similares a los utilizados en el presente artículo, encontrando que las diferencias de consumo (kWh/año m²) entre algunos de ellos llegan a ser de hasta 3 veces. Además la percepción del confort térmico durante el verano por parte de los usuarios fue de "inconfortable" en un 81,2% de los casos.

Muy recientemente Oropeza-Pérez y Østergaard (2014) han analizado el potencial de ahorro energético en todo el país a través de la simulación de 27 casos mediante un modelo de ventilación simplificado. Comprueban que el potencial de ahorro es mayor en climas cálidos y secos, utilizando materiales con alta capacidad calorífica. Para climas cálidos y húmedos son preferibles los materiales de baja capacidad calorífica y para condiciones de mucha humedad la ventilación natural resulta menos apropiada.

Con la conjunción de las condiciones exteriores y el diseño del edificio adecuados, la ventilación natural puede asegurar el confort térmico de los ocupantes siempre que se regule adecuadamente. Por lo tanto ésta debe ser una estrategia que debería de tener la máxima prioridad entre los agentes implicados en la promoción y construcción de viviendas en México (Oropeza-Perez I., Østergaard, P.O., 2014b).

2. Metodología. Fase de introducción de datos.

2.1 Zonas Climáticas

Según la clasificación de los climas en México se han seleccionado ciudades con climas cálidos como Acapulco, Veracruz, Monterrey, Tapachula, Cancún y Chihuahua.

La clasificación como clima cálido o templado la determina la isoterma de 18°C (<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/clima/metodologia.aspx>). Para el cálculo de los resultados se ha empleado los datos meteorológicos de Meteororm del que obtenemos datos de temperatura exterior, humedad relativa, radiación solar y viento cada 10 minutos a lo largo de un periodo anual. Estos datos son los que utiliza el programa para calcular el comportamiento térmico de la vivienda en régimen transitorio.

Los referidos datos de Meteororm se introducen en el programa a través de un input denominado Type 109, lo que permite analizar el comportamiento de un mismo modelo de edificio en distintas zonas climáticas. Trabajar con programas de régimen transitorio permite obtener resultados más reales, ya que el comportamiento de la vivienda varía continuamente según las condiciones ambientales exteriores.

Tabla 1: Climas de las seis ciudades representativas elegidas

| ESTADO | CIUDAD | CLIMA | Temp. Media Anual °C | Temp. Max °C | Temp. Min °C | % HR |
|--------------|-----------|------------------|----------------------|--------------|--------------|------|
| Guerrero | Acapulco | Tropical húmedo | 27,7 | 32,4 | 23 | 75 |
| Quintana Roo | Cancún | Cálido subhúmedo | 27,3 | 30 | 22,7 | 79 |
| Chihuahua | Chihuahua | Seco semicálido | 18,6 | 26,3 | 10,8 | 50 |
| Monterrey | Monterrey | Semiárido cálido | 22,9 | 28,6 | 17,2 | 65 |
| Chiapas | Tapachula | Cálido Subhúmedo | 26,8 | 33,7 | 19,9 | 74 |
| Veracruz | Veracruz | Tropical cálido | 25,4 | 28,8 | 22 | 79 |

2.2 Identificación de la vivienda tipo

El análisis se ha realizado con dos viviendas tipo, aisladas para el estudio, con el objetivo de conocer el comportamiento de cada una de ellas en un escenario extremo. Se trata de dos viviendas compactas con una superficie construida de 36 m² como mínimo, siguiendo las directrices del Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores (Infonavit, <http://portal.infonavit.org.mx/>).

Para el análisis y desarrollo del trabajo se aplican los siguientes pasos

1. Con el Type building project multi zone del simulador TRNSYS se diseña una vivienda en 3D donde se introduce la geometría de la vivienda a estudiar y los materiales con los que está compuesta.
2. Se establece cada de uno de los parámetros de cálculo considerando en el estudio la geometría, la orientación, la envolvente térmica, la zona acristalada y los sistemas previstos de climatización que serán los indicadores de la cantidad de demanda energética.
3. Se definen los datos meteorológicos de diferentes climas a estudiar.
4. Se hacen simulaciones con distintas propuestas constructivas en las que se emplean distintos materiales.

2.3 Materiales de la envolvente térmica.

Para introducir los datos en el programa es imprescindible definir los materiales de la envolvente térmica. Consideramos que los materiales empleados para la construcción de la vivienda de interés social son comunes en todas las comarcas de México. Se trata de materiales convencionales y con poco nivel de industrialización.

- La tabla 2 muestra la resistencia térmica (m²K/W) en las tres fachadas consideradas en las distintas simulaciones. Se han considerado resistencias térmicas considerablemente distintas para poder observar fácilmente los efectos de la resistencia del cerramiento sobre los resultados.

Tabla 2. Fachada. Estrategias en fachadas utilizadas en la simulación.

| Fachada | Composición | Espesor (m) | R (m ² K/W) |
|---------|-------------------------------|-------------|------------------------|
| S1 | hormigón | 0.11 | 0.67 |
| S2 | tabique de ladrillo hueco | 0.06 | 0.35 |
| S3 | tabique de l.h. + aislamiento | 0.10 | 1.35 |

- Suelo. El cerramiento inferior está en contacto con el terreno. La resistencia térmica considerada para el cálculo se presenta en la tabla 3. Para esta propuesta la resistencia es muy pequeña, semejable a un cerramiento sin aislamiento térmico y con alta conductividad. En este estudio no se han modificado las características del suelo para los distintos casos analizados.

Tabla 3. Características del suelo considerado.

| Suelo | Espesor (m) | R (m ² K/W) |
|-------|-------------|------------------------|
| Suelo | 0.1 | 0.04 |

- Cubierta. Cerramiento horizontal superior en contacto con el ambiente exterior. La resistencia térmica empleada en este cerramiento se presenta en la tabla 4.

Tabla 4. Cubierta. No transitable.

| Cubierta | Espesor (m) | R (m ² K/W) |
|----------|-------------|------------------------|
| Suelo | 0.26 | 0.64 |

- Carpintería. Se han considerado dos tipos de carpintería convencionales, de madera y metálica de aluminio. En la tabla 5 se resumen los valores de transmitancia térmica para cada uno de los tipos empleados en la simulación.

Tabla 5. Carpintería.

| Carpintería | U (W/m ² K) |
|-------------|------------------------|
| Madera | 2.2 |
| Aluminio | 5.7 |

3. Metodología. Fase de simulación.

Se ha realizado un diseño experimental teniendo en cuenta las siguientes variables:

- Geometría de la vivienda; se analizan dos tipologías manteniendo constante la superficie útil.
- Solución constructiva de la fachada; se analizan las tres soluciones constructivas descritas, manteniendo constante el espesor de la misma.
- Orientación de la vivienda; se analizan cuatro orientaciones (Norte, Este, Sur y Oeste).
- Porcentaje de acristalamiento para una orientación dada; se analizan tres porcentajes distintos (100 %, 80% y 60%).
- Tipología del vidrio en ventanas; se analizan tres tipos de vidrios (sencillo, doble y doble bajo emisivo).
- Carpintería en ventanas; se analizan dos tipos de marcos (aluminio y madera).

Se han realizado 216 simulaciones (2x3x4x3x3) teniendo en cuenta todas las variables de forma independiente para poder ver el efecto de cada una de ellas en los resultados. Se exceptúa el caso de la carpintería exterior, ya que de las seis posibles combinaciones solo se han tenido en cuenta tres (aluminio con vidrio sencillo, madera con vidrio doble y madera con vidrio bajo emisivo). Las soluciones constructivas del techo y el suelo se han mantenido fijas.

3.1 Geometría de la vivienda

En este trabajo se proponen dos viviendas con la misma superficie útil pero con distinta compacidad. El trabajo se realiza con la vivienda Tipo A es rectangular y la Tipo B cuadrada. A continuación se analizan los dos tipos de viviendas analizados.

1. Las dimensiones exteriores para la vivienda Tipo A: 4,0 x 9,0 m en planta y 2,3 m de altura libre.
2. Las dimensiones exteriores para la vivienda Tipo B: son de 6,0 x 6,0 m en planta y 2,3 m de altura libre.
3. El volumen de aire interior varía en cada una de las viviendas total de la vivienda, es el volumen de aire interior que debemos considerar para su climatización. Para la vivienda Tipo A: 74,04 m³ y para la vivienda Tipo B: 74,73 m³
4. La superficie útil de cada vivienda será de 32,16 m² para la vivienda Tipo A y 32,49 m² para la vivienda Tipo B. La pequeña variación de la superficie viene dada por el espesor de los cerramientos considerados.

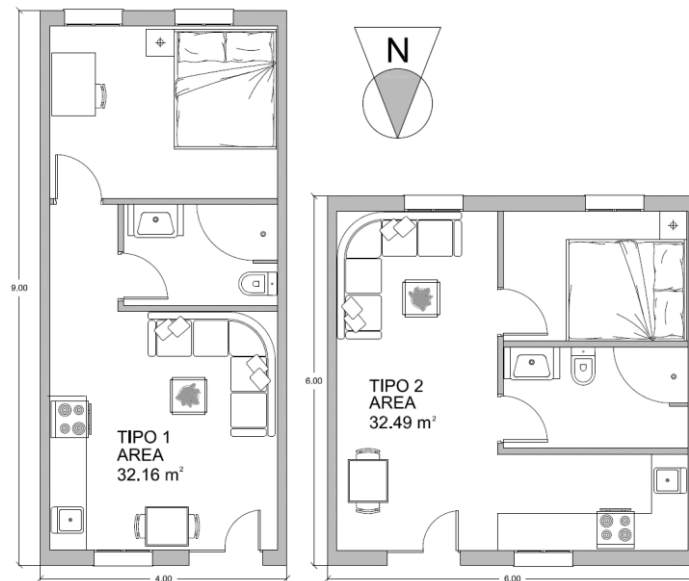
Ambos tipos de vivienda tienen la misma superficie, orientación y superficie de huecos acristalados, además, tienen la misma composición material en todos los elementos constructivos. A partir de estos tipos se inician las simulaciones para conocer la influencia de diferentes variables.

Simplemente el factor de forma hace que se obtengan resultados diferentes ya que la superficie expuesta al exterior varía.

3.3 Envoltente térmica

Analizar la influencia que tiene el aislar los cerramientos sobre la demanda total de las viviendas es el objeto de este apartado. La tipología considerada en este documento es una vivienda con inercia térmica S1, poco aislada S2, con aislamiento S3.

Figura 1: Plantas de vivienda analizadas. Tipo A (1 en la figura) y B (2).



3.4 Orientación de la vivienda

Una vez definidas las viviendas, se ha supuesto el dato de partida con orientación norte en la fachada de acceso y sur en la fachada trasera. A partir de esta orientación se ha ido rotando la vivienda y se ha obtenido el resultado cada 90 grados, de forma que se analizan cuatro orientaciones distintas para cada vivienda.

Tabla 6: Casos considerados para el porcentaje de acristalamiento

| | Porcentaje de acristalamiento | | |
|--------------------|--------------------------------------|-----|----|
| | En fachada en la orientación elegida | 100 | 80 |
| En fachada opuesta | 0 | 20 | 40 |

3.5 Carpintería exterior y vidrio en ventanas

Como se ha indicado solo se han analizado tres de los seis casos posibles por considerarlos más representativos:

- Marco aluminio con vidrio sencillo.
- Marco madera con vidrio doble
- Marco madera con vidrio doble bajo emisivo

4. Resultados y Conclusiones

Para analizar los resultados de los 216 experimentos realizados se ha optado por emplear diagramas de “cajas y bigotes” (box-plots, box and whiskers). Estos representan los tres cuartiles y los valores máximo y mínimo de una serie de datos. Los lados del rectángulo representan el primer y tercer cuartil y la línea intermedia representa la mediana. Entre otras cosas se visualiza muy bien la asimetría de la distribución.

Dentro de las 6 ciudades de clima cálido analizadas, Chihuahua y Monterrey presentan temperaturas medias anuales significativamente inferiores a las cuatro restantes, lo que queda reflejado en los resultados obtenidos.

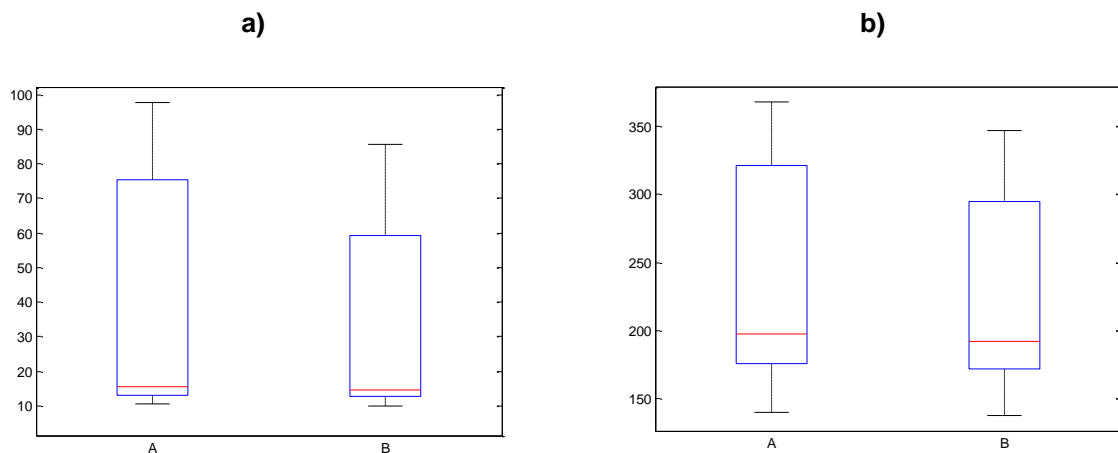
Para evitar el exceso de figuras, para cada caso analizado se muestran solo los resultados correspondientes a dos de las seis ciudades que se han considerado como más representativas.

4.1 Tipo de vivienda

Como se observa en la figura 2, ambos tipos de vivienda tienen demandas (mediana) muy similares. La importancia de este parámetro no es por lo tanto muy significativa aunque la variabilidad de los resultados es mayor en la “tipo A” debido a su planta rectangular (los cambios de orientación afectan más a los resultados).

En todas las ciudades se observa una clara asimetría positiva (los datos tienden a concentrarse hacia la parte inferior de la distribución).

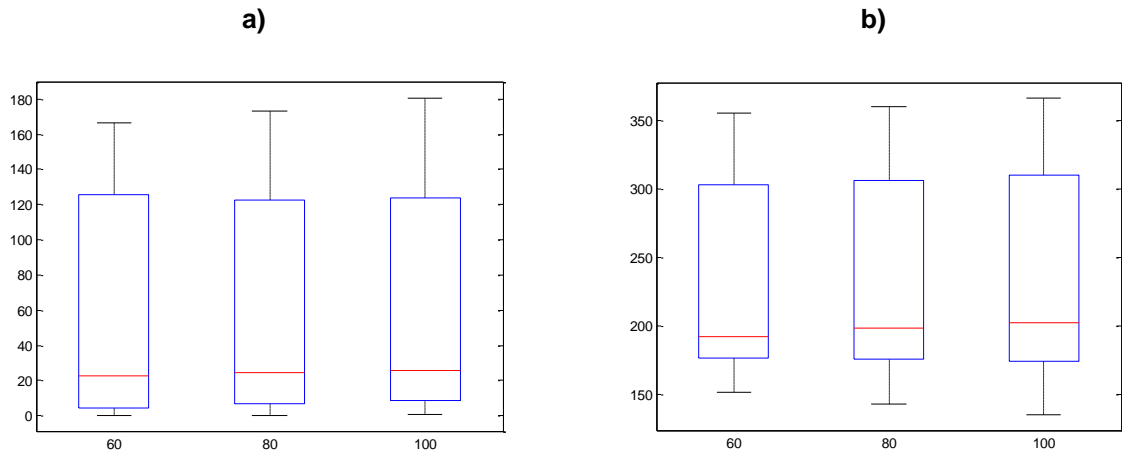
Figura 2: Q_{tot} (kWh) vs. tipo de vivienda (A y B) a) Cancún, b) Chihuahua



4.2 Porcentaje de acristalamiento

Para analizar la influencia de este parámetro se han empleado los casos presentados en la tabla 6. Como se observa en la figura 3, la influencia de éste parámetro, según se ha planteado, tampoco resulta significativa. Ello es debido a que el total del acristalamiento siempre es el 100%, por lo que, al ir variando la orientación para cada uno de los tres casos, las posibles diferencias se compensan.

Figura 3: Qtot (kWh) vs. % acristalamiento a) Acapulco, b) Chihuahua

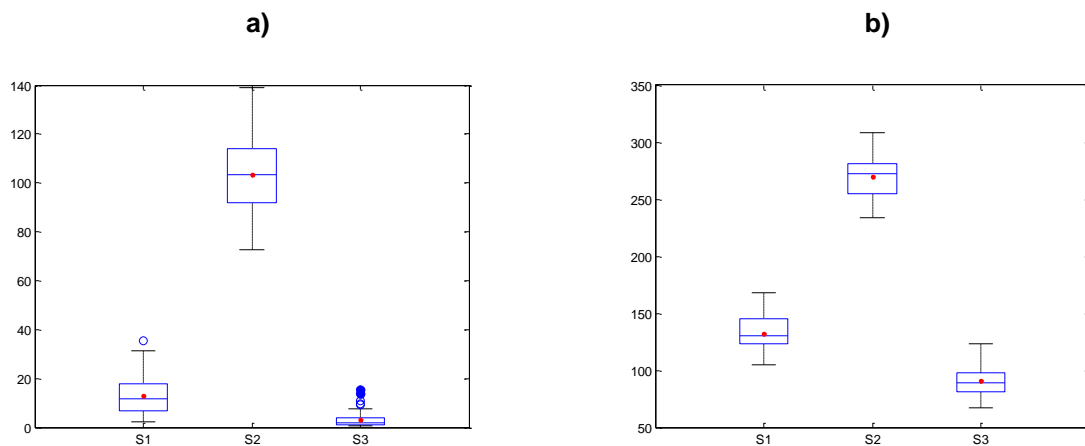


4.3 Envolverte

Como se observa en la figura 4, es la variable que más afección tiene en los resultados. Por otra parte las cajas y bigotes son mucho más cortos que en el resto de figuras siendo la superposición de éstos, cuando se analiza la influencia de otras variables, la que los alarga. Por este motivo, en algunos casos se presentan valores atípicos (señalados en rojo) que son los que se encuentran más allá de 1,5 veces el rango intercuartílico (límite señalado por los bigotes).

Se observa la enorme diferencia de la envolverte S2 respecto a las otras dos y la ligera (más significativa en el caso de Monterrey) mejora aportada por la envolverte S3 frente a la S1.

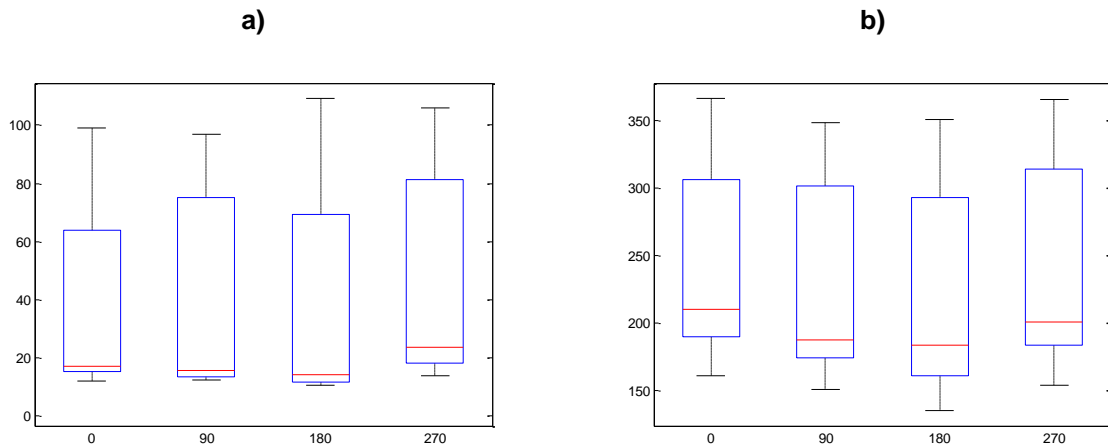
Figura 4: Qtot (kWh) vs. envolverte a) Tapachula, b) Monterrey



4.4 Orientación

La orientación Oeste es la peor para las seis ciudades analizadas lo que es lógico al tratarse de climas cálidos. Para el caso de Chihuahua, cuya temperatura media es la inferior de las seis y su altitud sobre el nivel del mar de 1482 m, la orientación Norte resulta igualmente desfavorable.

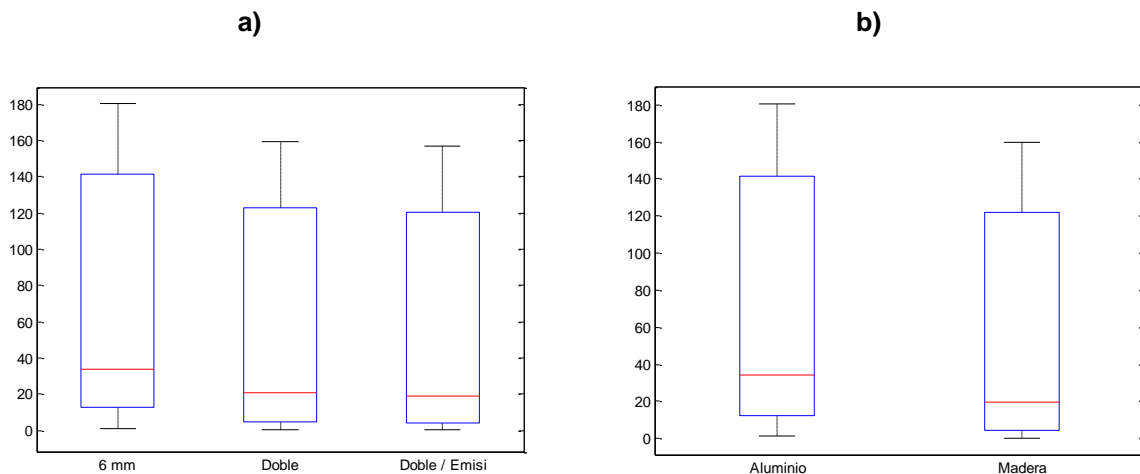
Figura 5: Qtot (kWh) vs. orientación a) Veracruz, b) Chihuahua



4.5 Carpintería y vidrio

Los resultados refrendan para las seis ciudades la mejora que supone el empleo de carpintería de madera con vidrio doble frente a la de aluminio con vidrio sencillo. La introducción de vidrio de baja emisividad es sin embargo muy poco significativa.

Figura 6: Qtot (kWh) vs. tipo de vidrio (a) y carpintería (b) en Acapulco



5. Conclusiones

Profundizando en el estudio expuesto en la pasada edición del congreso (Castelán, Aparicio, Vivancos, 2014) se ha sistematizado la obtención de resultados a partir de 216 experimentos que consideran cada variable analizada de forma independiente, para poder ver el efecto de cada una de ellas en los resultados.

Dichas variables han sido: la geometría de la vivienda, la solución constructiva de la fachada, la orientación, el porcentaje de acristalamiento para una orientación determinada, y la carpintería y tipo de vidrio.

Para visualizar los resultados se ha optado por emplear diagramas de “cajas y bigotes” por su facilidad de lectura. Dentro de las 6 ciudades de clima cálido analizadas, Chihuahua y Monterrey presentan temperaturas medias anuales significativamente inferiores a las cuatro restantes (debido a sus altitudes más elevadas), lo que queda reflejado en los resultados obtenidos.

De entre todas las estrategias de mejora analizadas, la que produce ahorros más significativos es la mejora de la solución constructiva de la fachada. La incorporación de 40 mm de poliuretano a un cerramiento de ladrillo hueco sencillo de 60 mm reduce en la mayoría de casos la demanda de energía a menos de la tercera parte.

Otras variables como la orientación o el aislamiento de huecos también se han revelado como significativas.

5. Referencias

- Castelán Peña J. A., Aparicio Fernández C., Vivancos Bono J. L. (2014). La eficiencia energética como una herramienta de planificación estratégica en un proyecto de vivienda tipo. 18th International Congress on Project Management and Engineering. AEIPRO.
- CONAVI. (2010). *Código de Edificación de Vivienda*. www.conavi.gob.mx.
- Fundación IDEA. (2013). *Estrategia nacional para la vivienda sustentable*. México.
- Griego D., Krarti M., Hernández-Guerrero A. (2012). Optimization of energy efficiency and thermal comfort measures for residential buildings in Salamanca, Mexico. *Energy and Buildings* 54, 540–549.
- International Energy Agency. (2013). *Transition to sustainable buildings. Strategies and opportunities to 2050*.
- NORMA Oficial Mexicana NOM-020-ENER-2011. *Eficiencia energética en edificaciones. Envoltante de edificios para uso habitacional*. <http://www.economia-noms.gob.mx/noms/detalleXNormaAction.do>
- Oropeza-Pérez I., Østergaard P.A. (2014). Energy saving potential of utilizing natural ventilation under warm conditions – A case study of Mexico. *Applied Energy* 130 20–32.
- Oropeza-Pérez I., Østergaard P.A. (2014b). The influence of an estimated energy saving due to natural ventilation on the Mexican energy system. *Energy* 64 1080-1091.
- Romero R.A., Bojórquez G., Corral M., Gallegos R. (2013). Energy and the occupant's thermal perception of low-income dwellings in hot-dry climate: Mexicali, México. *Renewable Energy* 49 267-270.

Rosas-Flores J.A., Rosas-Flores D., Morillón Gálvez D. (2011) Saturation, energy consumption, CO₂ emission and energy efficiency from urban and rural households appliances in Mexico. *Energy and Buildings* 43 10–18

Solís D. (2010). Análisis térmico de una vivienda económica en clima cálido-seco bajo diferentes orientaciones y medidas de sombreado. *Estudios sobre arquitectura y urbanismo del desierto, 2010*. <http://www.dad.uson.mx/esaud.html>