

## EVALUACIÓN COMPARATIVA MEDIANTE SIMULACIÓN CON ENERGYPLUS DEL COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO DE UNA VIVIENDA TIPO DUPLEX Y SU MEJORAMIENTO TÉRMICO

M. Maurin<sup>1</sup>, F. Pernon<sup>1</sup>, M. García Santa Cruz<sup>2</sup> y J. Czajkowski<sup>3</sup>  
Laboratorio de Arquitectura y Hábitat Sustentable  
Facultad de Arquitectura y Urbanismo - UNLP  
Calle 47 Nro 162 C.P. 1900 – La Plata  
Tel. 0221-4236587/90 int 255. email: layhs@fau.unlp.edu.ar

**RESUMEN:** El objetivo del trabajo consiste en mostrar un protocolo de capacitación para el uso del programa Energy Plus mediante la modelización de viviendas unifamiliares usuales en La Plata y a partir de su comportamiento higrotérmico y energético implementar mejoras tendientes a transformarlas en viviendas de baja energía. Los casos de partida surgen de relevamientos realizados con anterioridad y responden a los sistemas constructivos encontrados en la región. El modo e intensidad de uso de los casos se sustenta en una media del comportamiento social encuestado por los proyectos de investigación del laboratorio. En cuanto a ocupación se determinó en primer lugar el comportamiento térmico de los casos en evolución natural sin personas. Se presentan resultados y se los discute a fin de obtener entrenamiento en modelización y simulación numérica.

**Palabras clave:** comportamiento térmico, simulación, modelización, viviendas, eficiencia energética.

### 1. INTRODUCCIÓN

En diciembre del 2009 la empresa Saint-Gobain Argentina S.A. firmó un convenio de cooperación y trabajos a terceros con el LAyHS-FAU-UNLP con el objetivo de analizar las principales soluciones constructivas en el país y sobre éstas proponer mejoras a fin de cumplir con el estándar que vienen impulsando en Europa denominados “Multi Comfort House”. Sobre esta base se propuso un modelo edilicio ideal denominado *Modelo edilicio y tecnología de alta eficiencia energética* – MEyTAEE que desarrollo a lo largo del año 2010. A principios del 2011 se aceptó la propuesta para recibir estudiantes avanzados de ingeniería de la Ecole Catholique d’Arts et Métiers - Ecole d’Ingenieurs de Lyon, France; y de los proyectos en curso en el Laboratorio decidieron incorporarse para colaborar en los desarrollos que se venían realizando para Saint-Gobain. Para esto su pasantía se resolvió en dos partes donde la primera consistió en un entrenamiento acelerado de simulación mediante el EnergyPlus de casos de menor complejidad, en este caso viviendas unifamiliares, con el fin de llevarlas a una situación de lo que se conoce a nivel internacional como *edificios de baja energía*, para luego trabajar en el MEyTAEE de mayor tamaño y de mayor complejidad.

El concepto de viviendas Multi-Comfort House se apoya en el concepto de Tríada Energética: a. Reducir la demanda de energía evitando el derroche e implementando medidas de ahorro energético; b. Usar energías renovables en la mayor medida posible y c. Producir la energía fósil eficientemente y usarla cuando ya no haya otra alternativa (Isover, 2011). Por otra parte en el aspecto de demanda energética se basa en los conceptos *Passive House* con la consecuente alta eficiencia energética.

El concepto de *Passive House* se desarrolló en Alemania en los años 80 y es una muestra de una evolución hacia viviendas de bajo consumo energético. Para esto se recurre a una importante mejora de la calidad térmica de la envolvente, al uso de las fuentes de calor internas y a minimizar las pérdidas por infiltración. En ciertos casos con un sistema de recuperación de calor y se busca no utilizar sistemas de refrigeración ni calefacción convencionales. La demanda de calefacción debería ser inferior a 15 kWh/m<sup>2</sup> al año e implica una reducción de más del 90 % en la demanda de energía.

Para viviendas construidas en climas moderados se sugieren valores de transmitancia térmica  $K$  para muros y techos de aproximadamente 0,1 W/m<sup>2</sup>.K, y para las ventanas y las puertas un valor de 0,8 W/m<sup>2</sup>.K, incluido el marco. Debe priorizarse la ventilación natural. En países con clima cálido, los valores de  $K$  para muros y techos deberían estar entre 0,3 y 0,45 W/m<sup>2</sup>.K, y para las ventanas y las puertas deberían tener un valor  $K$  de 1,1 W/m<sup>2</sup>.K, incluido el marco. Misma recomendación para ventilación natural. En países de clima frío los valores  $K$  para muros y techos deberían ser de 0,07 W/m<sup>2</sup>.K, y para las ventanas y las puertas deberían tener un valor  $K$  de 0,6 W/m<sup>2</sup>.K.

<sup>1</sup> Pasante Ecole Catholique d’Arts et Métiers - Ecole d’Ingenieurs de Lyon, France.

<sup>2</sup> Secretario y personal apoyo LAyHS.

<sup>3</sup> Director LAyHS, Profesor titular FAU-UNLP e Investigador CONICET.

En el trabajo se muestran los resultados de la experiencia del entrenamiento trabajando sobre casos semejantes a los reales y las dificultades para alcanzar un confort anual razonable mediante diseño de la envolvente y medios pasivos; con el fin de obtener una reducción superior al 80% en la demanda de energía de la vivienda. La metodología de entrenamiento implica partir de un modelo simplificado y agregar complejidad progresiva para conocer el efecto que causa cada decisión de proyecto y facilita la comprensión de errores. Se busca alcanzar resultados semejantes a los protocolos internacionales con soluciones locales de costo razonable y, en esta etapa, sin incorporar sistemas pasivos o activos de energías renovables que excedan el uso de ventanas y afectar al mínimo la imagen de una vivienda convencional.

## 2. METODOLOGÍA

El caso estudiado es una vivienda unifamiliar de dos pisos para una familia compuesta por matrimonio y dos hijos. El edificio se encuentra implantado con el muro medianero orientado al sur, con el eje mayor este-oeste y la cara principal hacia el mediodía solar. Posee 8 ambientes y su superficie es de 68.16 m<sup>2</sup>. Cada ambiente esta representado como una *zona térmica*, a los efectos de la simulación. Se fija la temperatura de termostato de calefacción en 20°C y de refrigeración en 23°C a los efectos de obtener la demanda de energía. La base de datos climática corresponde a Buenos Aires. La tasa de renovaciones de aire se mantiene constante en ambos casos con n=1, que corresponde a una renovación total del aire por ambiente por hora. El proceso de mejoramiento se realiza en etapas.

### 2.1. Primera etapa

Creación de una zona térmica única que contempla la envolvente exterior sin tabiques interiores. No se plantean ventanas y los materiales son definidos por defecto por el programa Energy Plus. Esta etapa permite comprender el programa Sketch-Up y el Plug-in Open Studio haciendo la relación entre los datos constructivos de Sketch-Up y Energy Plus y también la elección de las variables necesarias y analizar resultados obtenidos por la simulación. Se obtiene el resultado esperado por el cual la temperatura interior del edificio sigue las mismas variaciones que la temperatura exterior. En efecto, no hay ningún aislamiento ni masa térmica en este paso.

### 2.2. Segunda etapa

Creación de un modelo más complejo que se compone de ocho zonas térmicas. Cada ambiente es representado por una zona térmica. Las escaleras y el baño se juntan en una zona sola, dada su pequeña superficie y su baja influencia en el balance térmico del edificio. Los materiales son los mismos que los de la primera etapa y todavía no hay ventanas. Excepto la renovación de aire exterior, cada zona esta considerada como un volumen independiente en el hecho que no hay intercambio de aire entre las zonas. Las superficies interiores como las paredes y el entepiso son elementos compartidos entre dos zonas. En primer lugar, tenemos que dibujar dos superficies de igual área, cada una en su propia zona. Al final, definimos esas paredes como compartidas (Outside Boundary Condition: Surface) precisando el nombre de la superficie adyacente en la posición Outside Boundary Object. En la definición de los materiales, hay que agregar las mismas capas de materiales para los dos muros compartidos, pero con un orden inverso. Podemos ver que esta etapa necesita mucho rigor en la denominación de las paredes o de las zonas y en la definición de las relaciones entre las zonas. La simulación en esta etapa permite notar rápidamente los errores de construcción y empezar el análisis con un edificio exacto.

### 2.3. Tercera etapa

Se incorporan al modelo ventanas y otras aberturas. En la planta baja, hay cuatro puertas vidriadas (dos en la fachada norte y dos en la fachada este) y una ventana en la fachada oeste, en el primer piso hay cinco ventanas (dos en la fachada norte, dos en la fachada oeste y una en la fachada este). No hay vidrio en la fachada sur. No se modifican los materiales de la envolvente opaca a fin de poder comparar la influencia del vidrio en la temperatura interior y el consumo de energía. Los resultados muestran que la presencia de ventanas y de puertas vidriadas en la construcción, además de representar una discontinuidad en el aislamiento del edificio, muestra el impacto respecto a su cantidad y orientación. La temperatura interior del edificio es mucho más variable que la etapa dos y los gastos energéticos resultan más elevados.

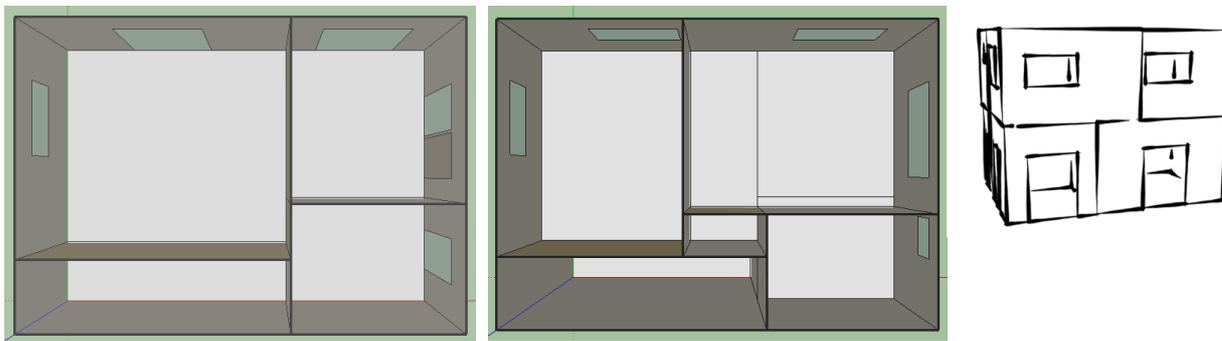


Figura 1: Esquema mostrando la planta baja, planta alta y cara norte de la vivienda analizada.

#### 2.4. Cuarta etapa

Adición de los materiales estándares utilizados en la construcción de viviendas en la actualidad en el país. Las paredes exteriores en mampostería de ladrillos huecos de 0,12 m revocado en ambas caras. Características principales: conductividad 0.439 W/m.K; densidad 778 kg/m<sup>3</sup>; calor específico 837 J/kg.K. Revoque: conductividad 0.44 W/m.K; densidad 800 kg/m<sup>3</sup>; calor específico 1080 J/kg.K.

Paredes interiores en forma constructiva similar que la pared exterior. La fundación mediante platea de H<sup>o</sup>A<sup>o</sup> de 0,2 m espesor y conductividad 1.95 W/m.K; densidad 2240 kg/m<sup>3</sup>; calor específico 900 J/kg.K. El entrepiso y techo en H<sup>o</sup>A<sup>o</sup> de 0,1 m espesor y conductividad 0.53 W/m.K; densidad 1920 kg/m<sup>3</sup>; calor específico 840 J/kg.K. Las ventanas con vidrios simples de 4 mm espesor y conductividad 0.9 W/m.K y las puertas en madera maciza de 40 mm espesor conductividad 0.15 W/m.K; densidad 608 kg/m<sup>3</sup>; calor específico 1630 J/kg.K.

#### 2.5. Quinta etapa

Se procede a realizar las simulaciones del caso convencional comparando resultados del comportamiento térmico y energético con resultados de monitoreos y auditorías energéticas realizadas en trabajos anteriores. Esta etapa es crítica ya que permite saber si el caso base en cuanto a temperaturas, amplitud térmica y retraso térmico son los esperables. Se verifican también temperaturas superficiales en tres puntos en interior y exterior y se comparan con casos auditados en que se tomaron temperaturas con termómetro infrarrojo. Cumplida esta fase se analizan y discuten los resultados obtenidos.

### 3. RESULTADOS

Se muestran los resultados del comportamiento térmico para los meses de enero y julio en las dos semanas que se identificaron como las críticas correspondientes al living en planta baja y el dormitorio principal en planta alta. Se muestran las curvas de demanda de energía en calefacción y refrigeración y una tabla síntesis. En este caso para la vivienda convencional.

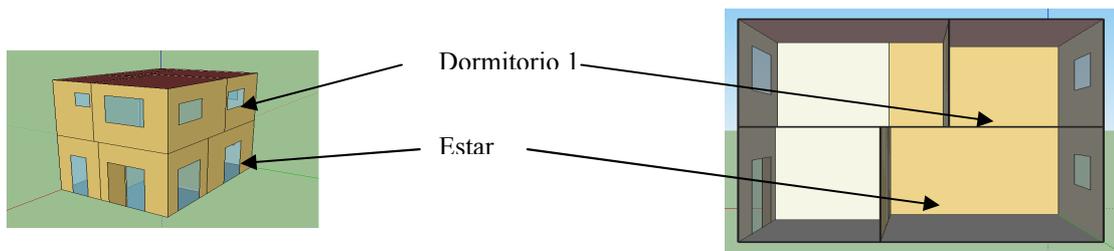


Figura 2: Esquemas indicando las habitaciones analizadas.

Designación	Demanda de energía
Demanda energética para calefacción (Termostato 20°C) [kWh/año]	7005,9
Demanda energética para refrigeración (Termostato 23°C) [kWh/año]	5323,3
Demanda energética total anual en climatización [kWh/año]	12329,2
Índice de demanda de energía en climatización [kWh/m <sup>2</sup> .año]	<b>180,9</b>

Tabla 1: Síntesis resultados demanda energía en climatización anual.

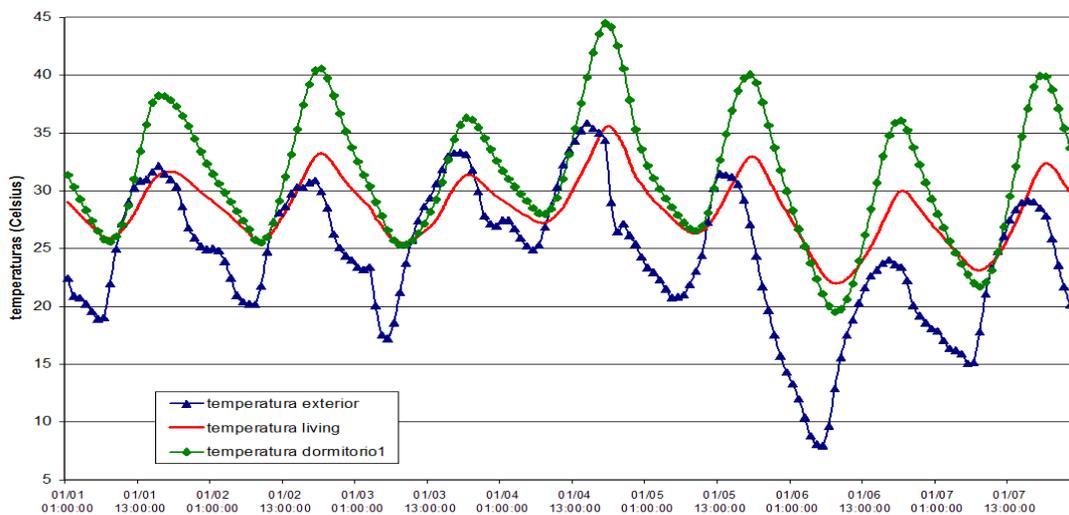


Figura 3: Comportamiento térmico en semana de verano, caso construcción convencional.

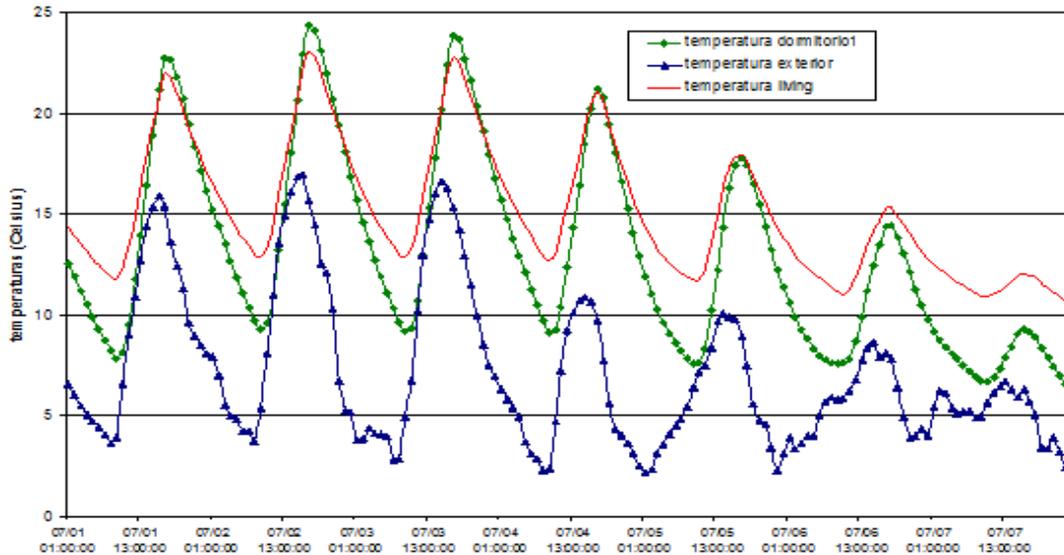


Figura 4: Comportamiento térmico en semana de invierno, caso construcción convencional.

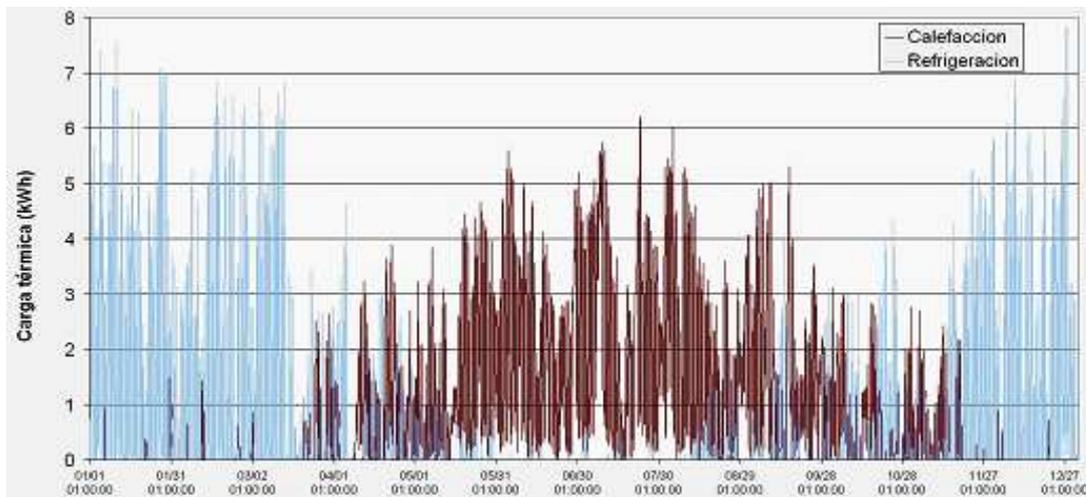


Figura 5: Evolución de la carga térmica anual de calefacción y refrigeración, caso construcción convencional.

### 3.1. Caso vivienda mejorada

Consideramos que se pueden plantear dos estrategias principales para mejorar el comportamiento de la vivienda: a. modificar el sistema constructivo aumentando el nivel de aislamiento térmico y b. mediante el manejo de la agenda de uso del Energy Plus simular la presencia de aislamiento móvil en ventanas (cortinas de enrollar).

Materiales: se busca mejorar el nivel de aislamiento térmico incorporando aislante liviano en las paredes, suelos, entrepisos y doble vidrio hermético en ventanas. La segunda mejora es agregar masa térmica al edificio aumentando el espesor de las paredes, mediante muros interiores de ladrillos huecos, con el fin de reducir la amplitud térmica interior. El aislamiento exterior se resuelve mediante la técnica EIFS (External insulation finish system).

Paredes exteriores: revoque interior 20 mm, ladrillo hueco 180 mm (conductividad 0.439 W/m.K; densidad 778 kg/m<sup>3</sup>; calor específico 837 J/kg.K), aislamiento térmico 70 mm (conductividad 0.03 W/m.K; densidad 43 kg/m<sup>3</sup>; calor específico 1210 J/kg.K), Base coat exterior 5 mm (conductividad 1.16 W/m.K; densidad: 1400 kg/m<sup>3</sup>; calor específico 837 J/kg.K)

Paredes interiores en ladrillo hueco 180 mm, suelo similar al caso convencional pero separado del terreno por 50 mm de aislante térmico (conductividad 0.03 W/m.K; densidad 43 kg/m<sup>3</sup>; calor específico 1210 J/kg.K). El entrepiso resuelto a modo de piso flotante con 20 mm de aislamiento termo-acústico (conductividad 0.06 W/m.K; densidad 368 kg/m<sup>3</sup>; calor específico 590 J/kg.K).

Techo: 100 mm de hormigón armado, capa de aire (resistencia térmica 0.18 m<sup>2</sup>.K/W), 70 mm de aislamiento térmico y 20mm de capa terminación exterior (conductividad 0.06 W/m.K; densidad 368 kg/m<sup>3</sup>; calor específico 590 J/kg.K). Se desprecian capas hidráulicas.

Ventanas: doble vidriado hermético (transmitancia 2.8 W/m<sup>2</sup>.K). Protección nocturna mediante cortinas de enrollar de madera 12 mm (conductividad: 1.3 W/m.K). Puerta de chapa metálica con 25 mm de aislamiento térmico en el alma (conductividad 45.28 W/m.K; densidad: 7824 kg/m<sup>3</sup>; calor específico: 500 J/kg.K). Las cortinas serán controladas por agenda y tienen el objetivo de frenar los rayos del sol en verano y mejorar el nivel de aislamiento térmico en invierno.

Para regular la temperatura interior, se cierran conforme a dos agendas, para el verano y el invierno. En verano, las cortinas están cerradas de día con el fin de limitar el calor del sol y evitar el aumento de las temperaturas. Están abiertos durante la noche para permitir que escape el calor por las ventanas. En invierno, la agenda se invierte, las cortinas están abiertas el día para disfrutar del calor del sol. Se cierran durante la noche y se usan como aislamiento térmico en las ventanas para mantener el calor adentro del edificio. Las transiciones entre las agendas de verano e invierno tienen lugar los 15 de marzo y 15 de noviembre. Son periodos críticos, como el cambio abrupto de uso de las cortinas genera altos picos de calor y frío. Los horarios de las agendas corresponden a la salida y puesta del sol de cada mes.

Designación	Demanda de energía
Demanda energética para calefacción (Termostato 20°C) [kWh/año]	274.5
Demanda energética para refrigeración (Termostato 23°C) [kWh/año]	1603.0
Demanda energética total anual en climatización [kWh/año]	1877.6
Índice de demanda de energía en climatización [kWh/m <sup>2</sup> .año]	27.5

Tabla 2: Síntesis resultados demanda energía en climatización anual, vivienda mejorada.

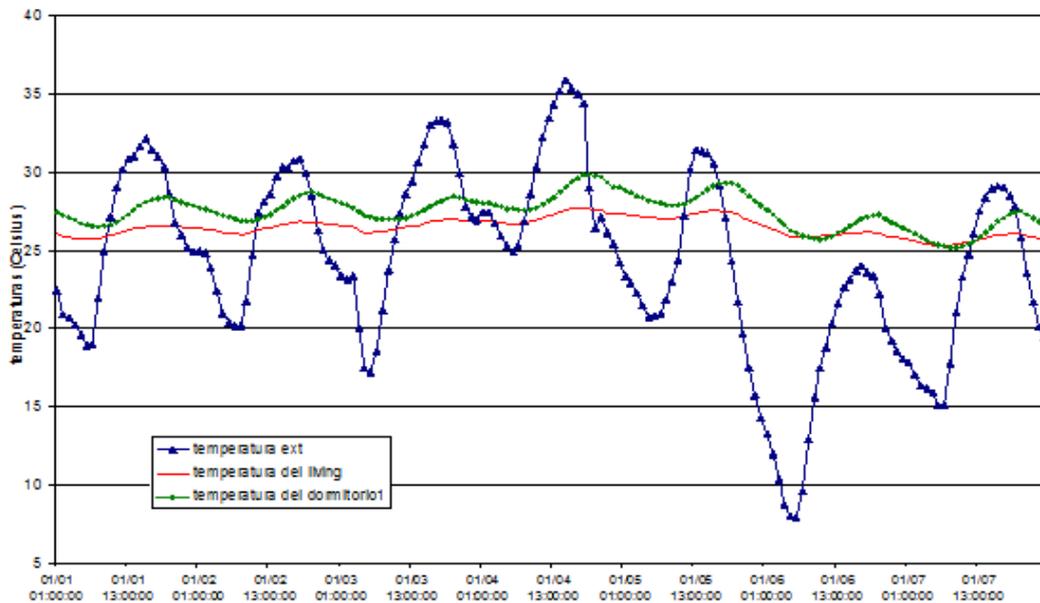


Figura 6: Comportamiento térmico en semana de verano, caso construcción mejorada.

Los resultados para los casos convencional y mejorado mostrados en las Figuras 3, 4, 6 y 7 corresponden al edificio en evolución natural en estado de ocupación, es decir, sin estar encendido el sistema HVAC en situación de termostato. Permite visualizar las sensibles mejoras que se generan en el comportamiento térmico.

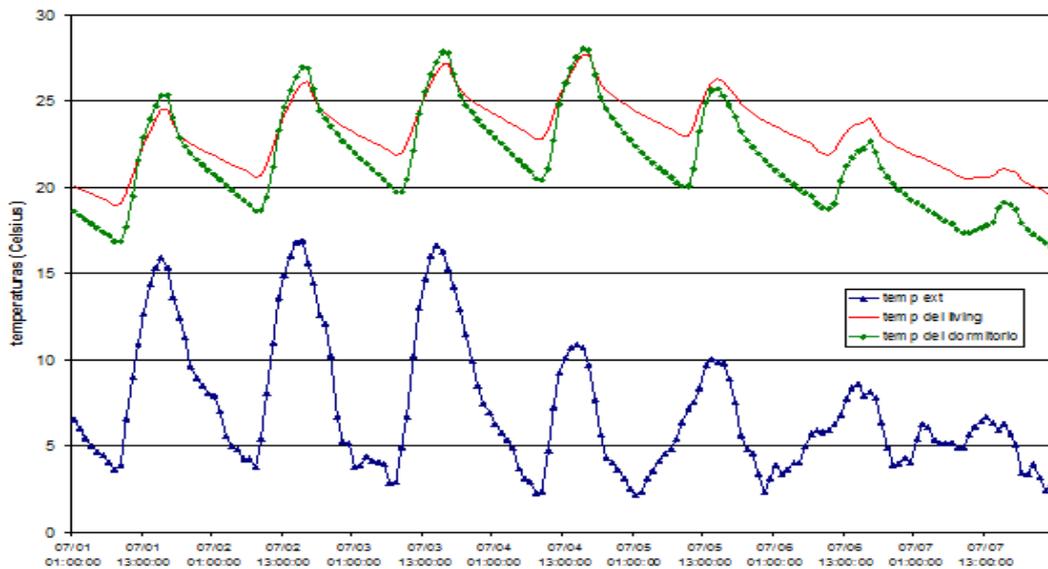


Figura 7: Comportamiento térmico en semana de invierno, caso construcción mejorada.

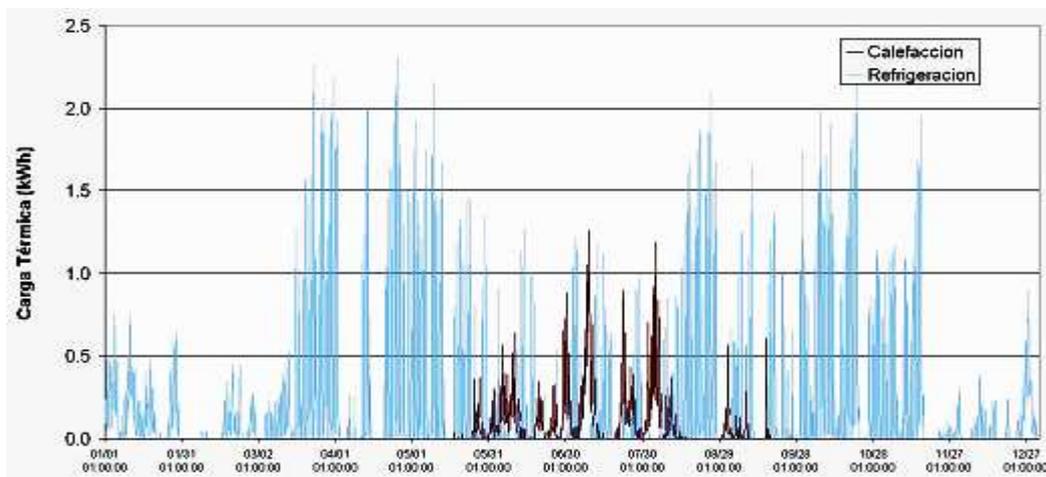


Figura 8: de la carga térmica anual de calefacción y refrigeración, caso construcción mejorada.

### 3.2. Comparación de casos

Las Figuras 9 y 10 nos muestran la muy importante reducción en la demanda de energía en climatización anual. Salvo algunos días fríos y nublados de invierno puede considerarse a la calefacción casi insignificante y restringida a los meses de junio a septiembre.

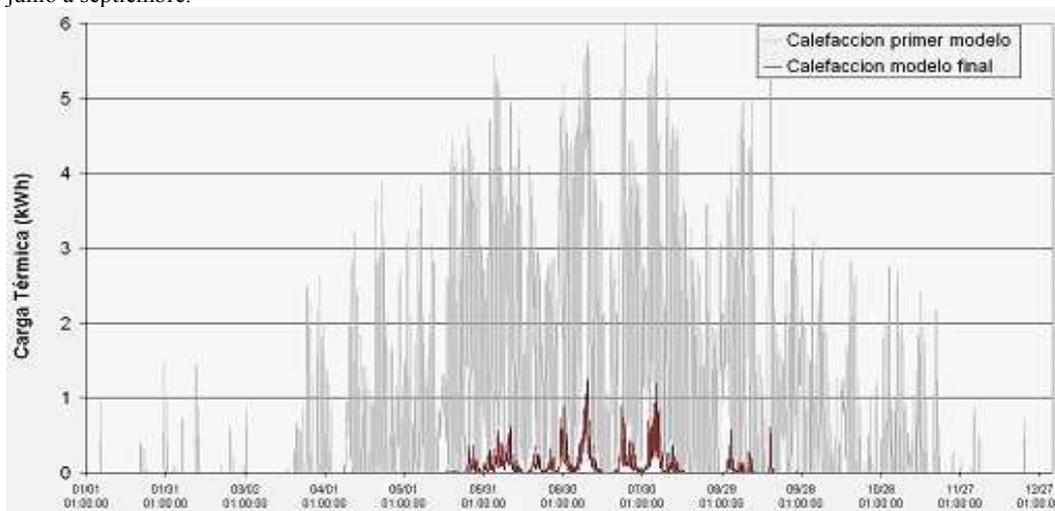


Figura 9: de la carga térmica anual de calefacción, comparación construcción convencional y mejorada.

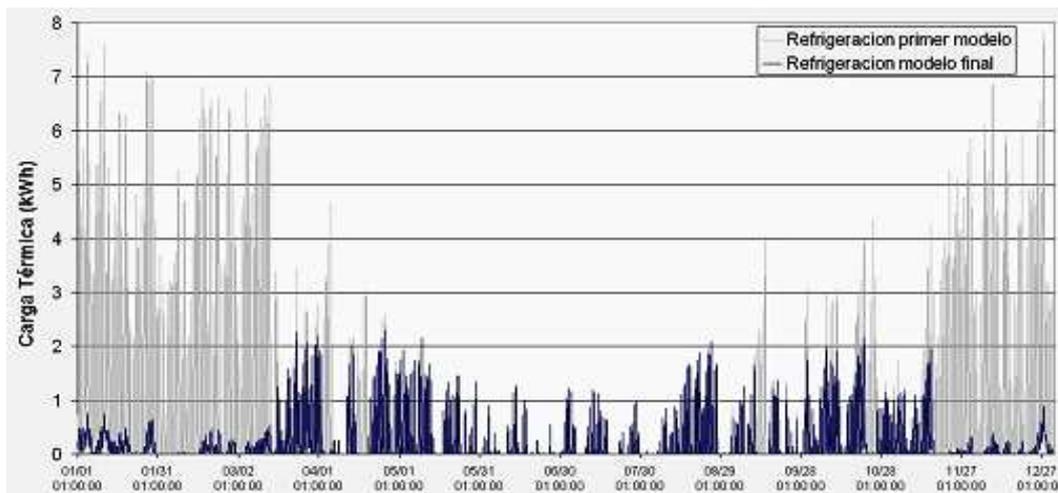


Figura 10: de la carga térmica anual de refrigeración, comparación construcción convencional y mejorada.

#### 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para empezar debe aclararse que solo se puede tener real control de resultados y comparación con casos auditados en la vivienda tipo dúplex convencional, ya que se cuenta con casos medidos. Viviendas con altos niveles de aislamiento térmico no son usuales todavía y debe recurrirse a la bibliografía y a un par de casos construidos en la región como marco referencial. Por otra parte el protocolo LEED que se apoya en las Normas ASHRAE 90.1 y 55 no requiere de experiencias previas solo de la aplicación de los estándares de referencia para definir el caso base. Es un concepto que deberíamos tender a adoptar en el mediano plazo.

Respecto a los resultados obtenidos, podemos notar que las temperaturas en los dos ambientes estudiados sin sistema de calefacción o de refrigeración son extremas: por ejemplo, temperatura de 44,5°C en la habitación el 4 de enero o 5,7°C el 7 de julio. Los gráficos muestran que las temperaturas son muy variables en la misma semana: entre 19°C y 45°C durante la primera semana de enero o como otro ejemplo, entre 11°C y 23°C en el living, durante la primera semana de julio. Para mantener las temperaturas constantes debemos instalar un sistema de HVAC (denominado “ideal” en Energy Plus) que nos permite tener una temperatura entre 20°C y 25°C en el edificio. Sin embargo, las grandes variaciones de temperatura implican gastos de energía muy importante como muestra la Tabla 2.

Las soluciones constructivas de aumentar el aislamiento térmico y la masa térmica del edificio pueden reducir significativamente el intervalo de temperatura en un día. El edificio esta menos sensible a los cambios de temperatura exterior. Las paredes absorben el calor durante el día y lo liberan durante la noche, lo que tiene como efecto de aumentar ligeramente la temperatura mínima.

Las cortinas tienen efectos opuestos en función de la época del año. En verano bloquean la luz solar y así reducen considerablemente la temperatura máxima (de 14 grados en el dormitorio), que baja a una temperatura cercana a los 27°C. En invierno, ofrecen una capa de aislamiento térmico adicional durante la noche para evitar que la temperatura mínima sea muy baja.

Los gráficos de carga térmica muestran la potencia generada por la calefacción y la refrigeración. La calefacción se utiliza principalmente en verano y la refrigeración en invierno. Estos valores disminuyeron significativamente con la mejora del edificio y parecen insignificantes en comparación con el modelo de construcción convencional.

El impacto en el consumo anual de energía es muy importante. Se reduce en un 84,7%, desde 180,9 kWh/m<sup>2</sup> año hasta 27,55 kWh/m<sup>2</sup> año. Este es un valor similar al de un edificio de baja energía según el protocolo Multi Comfort House que fija un valor admisible total de 15 kWh/m<sup>2</sup> año en climatización. El consumo de calefacción es casi nula (4 kWh/m<sup>2</sup> año). La mayor parte de la energía es usada por el sistema de refrigeración aún en ciertos días de invierno, sin embargo en estos días podría utilizarse únicamente la ventilación natural.

#### 5. CONCLUSIÓN

La utilización de programas bastante complejos como Energy Plus necesita una progresión paso a paso. Tenemos que revisar los resultados en cada etapa para identificar los errores posibles. Los resultados deben ser comparados con trabajos anteriores y casos monitoreados. Otra posibilidad es seguir el protocolo LEED en lo atinente a eficiencia energética edilicia usando el modelo subyacente en las ASHRAE 90.1 y 55.

Se observa que la modificación de los materiales constructivos y/o el agregado de sistemas simples, tales como cortinas de enrollar nos permiten reducir significativamente el consumo de energía del edificio.

Efectivamente, estas soluciones pasivas brindan a la construcción la capacidad de adaptarse al medio ambiente y utilizarlo para su beneficio.

En este caso, el sistema de cortinas controlado por una agenda pasible de automatización ayuda a regular el calor del sol y obtener una temperatura suficientemente cómoda sin gasto significativo de energía. Es precisamente el principio fundamental de la arquitectura ambientalmente consciente.

Aunque existe una mejora significativa, la simulación no tiene en cuenta la actividad interna del edificio (las personas, las luces, los equipos) que afecta el consumo de energía.

Debiera ampliarse el modelo para obtener resultados con ocupación a fin de incorporar cargas térmicas y demanda de energía en servicios (iluminación, cocción, agua caliente, otros). Un objetivo adicional sería un modelo de edificio autosuficiente, capaz de producir toda la energía que necesita.

El procedimiento de entrenamiento seguido ha resultado satisfactorio pero lleva tiempo y dedicación. En este caso se requirieron ocho semanas hábiles de dedicación completa para alcanzar estos resultados y una asistencia frecuente por parte de los tutores. Implica el manejo de idioma para seguir los manuales de entrenamiento de EnergyPlus provistos por el Departamento de Energía de EEUU y conocimiento y trabajo de campo previo por parte de los tutores.

## 6. REFERENCIAS

- Brun Adrien, Spitz Clara, Wurtz Etienne y Mora Laurent. (2009). Behavioural comparison of some predictive tools in a low-energy building. Building Simulation 2009. Glasgow, Scotland. Pp 1185-1190.
- ISOVER (2011). The Isover Multi-comfort house. Keep cool in hot countries- save natural resources. [<http://www.multicomforthouse.co.uk/files/The%20ISOVER%20Multi-Comfort%20House%20-%20for%20hot%20climate.pdf>]
- 7group y Bill Reed (2009). The Integrative design guide to Green Building. Redefining the practice of sustainability, 1ª edición Wiley & Sons, Inc. ISBN 978-0-470-18110-2.
- US Department of Energy. EERE- Energy Efficiency & Renewable Energy. Building Technologies Program: EnergyPlus Energy Simulation. [[apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus)]
- ANSI/ASHRAE Standard 90.1-2010 (I-P). Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings.
- ANSI/ASHRAE Standard 55-2010. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.

## ABSTRACT

The aim of this work is to show the training protocol for the use of Energy Plus program by modeling conventional single-family homes in La Plata and from their hygrothermal and energetic behavior to introduce improvements which are aimed at transforming them into low-energy houses. The cases arise from surveys conducted before and respond to the building systems found in the region. The mode and intensity of using of these cases is based on an average of social behavior surveyed by laboratory research projects. Concerning occupation first is determined the thermal behavior of natural evolution without people. Results are presented and are discussed in order to obtain training in modeling and numerical simulation.

**Keywords:** thermal performance, simulation, modeling, housing, energy efficiency