

Optimización y EVALUACIÓN del RENDIMIENTO TÉRMICO Y ENERGÉTICO

DE VIVIENDAS EN CLIMAS TEMPLADOS

SUSANA XIOMARA DELGADO-RAMÍREZ*, ANDREA LIZETH DÍAZ-PINEDA**, DORIS ABIGAIL CHI-POOL***

Optimization and evaluation of the thermal and energy performance of dwellings in temperate climates

Fecha de recibido:
22 abril 2023
Fecha de aceptado:
24 junio 2023

*Universidad de las
Américas Puebla,
México.

susana.delgadorz@
udlap.mx

**Universidad de las
Américas Puebla,
México.

andrea.diazpa@udlap.mx

***Universidad de
las Américas Puebla,
México

doris.chi@udlap.mx

RESUMEN. Este estudio presenta una metodología que integra criterios de diseño arquitectónico con enfoque bioclimático e implementa la simulación computacional para la evaluación del rendimiento térmico y energético de viviendas. El caso de estudio es una vivienda unifamiliar de interés social ubicada en Atlixco, Puebla, cuyo diseño se intervino con base en los criterios de la Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI) para clima templado subhúmedo. A través del programa ClimateStudio se realizaron comparaciones en las propiedades de transmitancia térmica de los materiales constructivos de la envolvente y se aplicaron criterios de diseño básicos como la orientación y el tamaño de las ventanas, así como la ventilación natural. Las simulaciones permitieron verificar y evaluar cuantitativamente el ahorro en la intensidad del uso de energía anual: se observó una disminución del 50% en las cargas de climatización y un 30% en las cargas de calefacción, comparando el caso de estudio antes y después de las adecuaciones. El contenido presentado en este artículo es resultado de los procesos de enseñanza-aprendizaje impartidos en las aulas de clase por medio de ejercicios prácticos de diseño arquitectónico y la evaluación de los proyectos mediante simulaciones computacionales. El uso de estos programas de simulación de energía es indispensable durante el proceso educativo y profesional de un arquitecto; hoy, la difusión de estas metodologías y herramientas es de gran relevancia.

Palabras clave: aislamiento térmico, diseño pasivo, intensidad del uso de energía, simulación energética.

ABSTRACT. This paper presents a methodology that involves architectural design criteria with a bioclimatic approach and implements computer simulations to evaluate the energy performance of dwellings. The case study was a social interest single-family dwelling located in Atlixco, Puebla. Its design was intervened based on the criteria of the Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI) for a temperate sub-humid climate. With ClimateStudio, different values for the thermal transmittance of the building materials of the envelope were tested. Basic design criteria were also applied, particularly the orientation and size of windows, as well as natural ventilation. Simulations allowed verifying the annual energy use intensity savings: a 50% decrease in cooling loads and a 30% decrease in heating loads were achieved, comparing the case study before and after the adequations. The content presented in this paper shows the results of the teaching-learning processes taught in the classroom through practical exercises in architectural design and the evaluation of projects through computer simulations. The use of energy simulation programs is now essential during the educational and professional process of architects, thus the diffusion of these methodologies and tools is crucial.

Key words: energy simulation, energy use intensity, passive design, thermal insulation.

E

n el contexto actual del calentamiento global, la reducción del consumo energético en las viviendas es un punto clave para combatir el impacto ambiental que tiene la generación de energía. Los sistemas urbanos y las viviendas consumen cerca del 50% de los recursos energéticos (CONAVI, 2015; SENER-CONUEE-INEGI, 2018). Por tanto, es necesario incorporar políticas y soluciones, como el diseño bioclimático y la eficiencia energética, las cuales pueden contribuir a mejorar la calidad del medio ambiente, asegurar los recursos naturales para las generaciones futuras, mejorar la calidad de vida de los habitantes e incentivar una cultura de ahorro y respeto ambiental (CONAVI, 2015).

En México, el desarrollo de un modelo de vivienda sustentable ha sido impulsado por el Gobierno Federal desde 2009, a través del Programa Hipoteca Verde del Instituto Nacional de Fondo para la Vivienda de los Trabajadores (INFONAVIT), junto con el Código de Edificación de Vivienda (CEV). El modelo ha permitido obtener hasta un 48% de ahorro de energía en los consumos de gas y electricidad, y una disminución de entre 1 y 1.5 toneladas en las emisiones de carbono (CO₂e) (CONAVI, 2015). Entre las estrategias ecológicas que incorpora el modelo de vivienda sustentable se enlistan soluciones tecnológicas de eficiencia energética y de energías renovables, como calentadores solares, lámparas ahorradoras, aislamientos térmicos en techos y muros, aires acondicionados de alta eficiencia, entre otros.

Asimismo, se han elaborado una serie de manuales con estrategias de diseño arquitectónico con enfoque bioclimático, aplicables según la región bioclimática de México (CONAVI, 2021, 2022). El objetivo de estos instrumentos es incorporar los criterios en los lineamientos de las normativas locales para los permisos de construcción de los municipios (CONAVI, 2015).

Los manuales CONAVI plantean diversas estrategias de diseño pasivos, las cuales se refieren a todos aquellos enfoques respetuosos con el medio ambiente, que aprovechan el clima y las condiciones de construcción para proveer confort higrotérmico interior para los usuarios y reducir la demanda de energía (Elaouzy and El Fadar, 2022).

La evaluación del rendimiento de una vivienda en la etapa de proyecto antes de su construcción es clave para alcanzar los objetivos del ahorro energético. Hoy existen programas computacionales que permiten simular el comportamiento energético de los edificios, mediante el Modelado del Rendimiento de los Edificios (BPM, Building Performance Modelling) (Pan *et al.*, 2023). El BPM permite hacer el cálculo de las cargas de los sistemas de calefacción, refrigeración y ventilación (Pan *et al.*, 2023). Para esto, se consideran las cargas internas, la radiación solar directa y difusa, los *procesos* de conducción y convección a través de la envolvente (DOE, 2016).

Para realizar estas simulaciones es necesario tener un conocimiento básico en termodinámica y transferencia de energía, así como cierto dominio del programa computacional. En esta investigación se utilizaron programas con licencia educativa gratuita, que han sido ampliamente validados por la comunidad científica (DOE, 2016). Específicamente, se utilizó ClimateStudio (Solemma LLC, 2021), software que permite predecir el rendimiento *luminico, térmico, energético*, entre otros, de las viviendas desde las etapas conceptuales del proyecto arquitectónico y tomar decisiones de diseño fundamentadas en resultados cuantitativos y cualitativos.

ClimateStudio ha sido utilizado en investigaciones enfocadas en el cálculo de métricas de iluminación natural con base climática a través de Radiance y su trazado de rayos inverso, permitiendo la caracterización óptica de materiales, como vidrios de color (Constanzo *et al.*, 2022), y diferentes componentes arquitectónicos. Por ejemplo, en (Gerui *et al.*, 2023), ClimateStudio permitió la caracterización de pequeños patios y pequeñas claraboyas de viviendas tradicionales en el sureste de China para evaluar la comodidad visual.

En el ámbito de la energía, ClimateStudio utiliza EnergyPlus como motor de cálculo (Jakubiec and Reinhart, 2011). EnergyPlus es un software ampliamente utilizado por la comunidad científica para evaluar el rendimiento energético de los sistemas en edificios convencionales. Vinculado a ClimateStudio, tiene la ventaja de permitir simulaciones térmicas en multizonas de edificios. En el caso de las viviendas, se ha implementado para evaluar las propiedades térmicas de los materiales de la envolvente y su impacto en las cargas de calefacción, climatización, ventilación, iluminación y otras (Vasco *et al.*, 2017; Hou *et al.*, 2022; Mongue Palma *et al.*, 2023).

En Le (*et al.*, 2022), ClimateStudio se implementó para el modelado de sistemas de protección solar dinámicos. Mediante esta herramienta, se crearon zonas para el análisis térmico y se asignaron las características de los sistemas constructivos, horarios de ocupación y de uso de los sistemas y equipamientos, se definieron las ganancias internas, entre otros. Lo anterior fue asociado a diferentes zonas climáticas para cuantificar los ahorros de energía por el uso de la luz natural y el confort térmico mediante métricas como la Intensidad del Uso de Energía (EUI) y el Porcentaje Estimado de Insatisfechos (PPD) por notar demasiado frío o demasiado calor.

En Sorooshnia (*et al.*, 2023), ClimateStudio se utilizó para evaluar el consumo energético y el confort térmico en viviendas ubicadas en climas templados de regiones de Sydney, Australia y Tehrán, Irán. Particularmente, se evaluaron diferentes acristalamientos dobles de baja emisividad, y se concluyó con tamaños de ventanas óptimos para determinadas alturas y longitudes de habitaciones orientadas hacia el sur, en ambas localidades.

En Buckley (*et al.*, 2021), ClimateStudio se utilizó para evaluar diferentes estrategias de rehabilitación del parque de 9000 viviendas de zonas urbanas en Dublín, Irlanda. El indicador EUI fue utilizado para especificar la combinación más rentable de modernización de la envolvente de las viviendas y su producción en el sitio; esto, para lograr una reducción del 60% en las emisiones de gases de efecto invernadero para el 2030. En esta investigación se estimó que el

80% de las viviendas existentes en la ciudad de estudio seguirán siendo utilizadas en el 2050, pero sólo el 1% está siendo rehabilitado. Por tanto, los autores resaltan la necesidad de la adecuación de las viviendas y la mejora de los estándares energéticos para lograr la disminución de las emisiones de carbono, no sólo en tal país sino también en el resto de Europa y a nivel internacional.

Objetivos

Este artículo presenta la aplicación de criterios de diseño arquitectónico con enfoque bioclimático y la evaluación de los resultados mediante programas de simulación del rendimiento de las viviendas. El objetivo es evaluar cuantitativamente el porcentaje de mejora en el rendimiento térmico-energético de viviendas sustentables, en términos del consumo de energía en climatización y calefacción, para lo cual se analizan las propiedades térmicas de la envolvente. Los resultados aquí presentados corresponden a ejercicios prácticos de diseño arquitectónico desarrollados en las aulas de clases, de modo que se contribuya con la formación y conciencia ambiental de los futuros profesionales.

METODOLOGÍA

El caso de estudio se describe en esta sección, junto con la metodología para implementar los programas para la evaluación del rendimiento térmico-energético.

Descripción del caso de estudio

El proyecto se desarrolla en Atlixco, Puebla, México, sitio con clima templado subhúmedo, con lluvias en verano (CONAVI, 2022). Según la clasificación Köppen, pertenece al clima Cwb, inviernos con bajas temperaturas o templados y veranos frescos; veranos lluviosos e inviernos secos (Gobierno de Navarra, 2023). El archivo climático utilizado es el EPW (EnergyPlus Weather) (University of California Berkeley, 2022) de la ciudad de Puebla, al ser la localidad

más cercana al sitio de estudio, a 35.1 km del Aeropuerto Internacional de Puebla. Los datos del archivo climático muestran una temperatura

media anual de 16 °C, una temperatura cálida media de 27 °C y una temperatura fría media de 5 °C (figura 1).

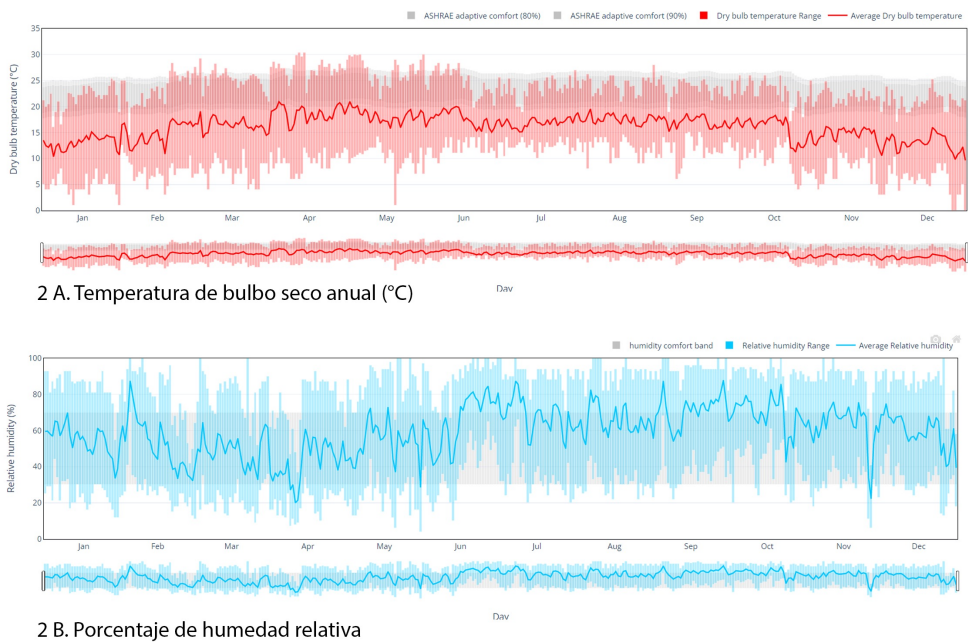


FIGURA 1. PARÁMETROS CLIMÁTICOS DEL ARCHIVO EPW DE LA CIUDAD DE PUEBLA. GRÁFICOS GENERADOS EN EL PROGRAMA CLIMATESTUDIO.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

El proyecto consiste en una vivienda unifamiliar de 136.00 m² de terreno y 91.00 m² de construcción. La figura 2 muestra la distribución y el área de las 12 zonas de la vivienda. En su diseño se consideraron las estrategias presentadas en el Manual para la vivienda sustentable en Atlixco, Puebla (CONAVI, 2021, 2022). La correcta orientación de las diferentes zonas fue clave en la distribución de la vivienda con la finalidad de proveer iluminación y ventilación naturales. Las ventanas se orientaron hacia el

este y sureste; en cambio, el suroeste se diseñó como una fachada opaca. Otra estrategia CONAVI implementada fue el emplazamiento en tablero para permitir y controlar la circulación del aire en el perímetro de las viviendas. Además, la vivienda se estructuró como una construcción compacta con ligeros remetimientos, lo que favorece que mayor área quede expuesta a la radiación solar y a los vientos dominantes. Otra estrategia bioclimática considerada fue una altura interior de 2.60 m para cada nivel.

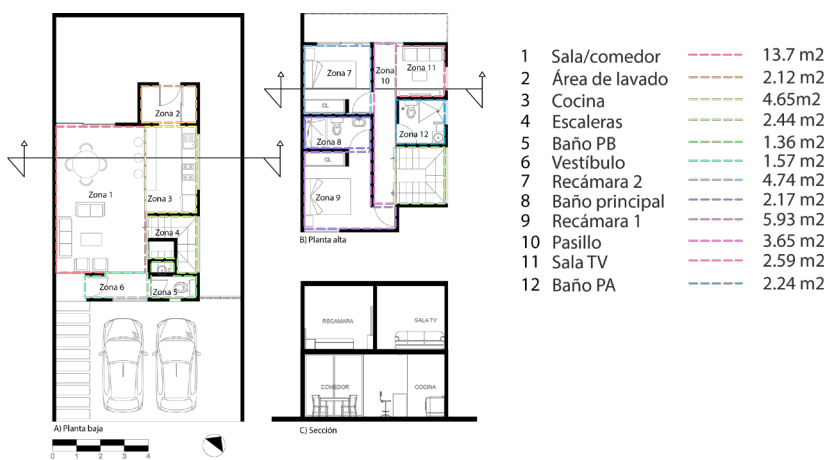


FIGURA 2. ZONAS CONSIDERADAS EN LA VIVIENDA UNIFAMILIAR: PLANTAS Y SECCIONES.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Simulación computacional

Para las simulaciones energéticas se utilizó ClimateStudio. Este software de análisis de desempeño ambiental, permite simular y evaluar la eficiencia energética de un espacio habitable, el rendimiento de la luz eléctrica, la comodidad térmica y el acceso a la luz natural, entre otros. En este trabajo, ClimateStudio se utilizó para el análisis térmico-energético de una vivienda unifamiliar; específicamente, se utilizó para modelar las zonas térmicas, caracterizar su materialidad y comportamiento térmico, así como para calcular las cargas de calefacción, climatización e iluminación, y la energía utilizada por los equipos, agua caliente y ventiladores. Los resultados permitieron realizar comparaciones del consumo de energía anual entre el caso base y las estrategias de diseño pasivo implementadas en la vivienda.

El modelo térmico se elaboró con Rhinoceros e incluyó los siguientes componentes:

- Zonas térmicas: El modelo se divide en bloques que representan las diferentes zonas térmicas, las cuales comparten características como las cargas internas, horarios de uso y ocupación, temperaturas de control para calefacción, refrigeración y ventilación, materiales constructivos, entre otras (figura 3A).
- Ventanas: Los vanos de la envolvente, *tales como ventanas o claraboyas*, se modelan con 'surfaces' sobre la zona correspondiente; es importante que estas superficies están completamente sobrepuestas sobre la zona térmica. Una vez que todos los vanos

han sido modelados, se asigna el material de acristalamiento. En la simulación del caso base se eligió el material estándar de acristalamiento simple, ampliamente utilizado en México. Posteriormente, en la parte de ajustes de ventilación, se especifica el área operable y el coeficiente de descarga, según aplique al tipo de ventana, *como lo es abatible, corrediza, pivote*, entre otras (figura 3B).

- Ventanas interiores: En el modelo térmico se incluyen ventanas interiores y transiciones entre zonas contiguas, mediante 'surfaces' planas sobrepuestas entre zonas. En ambos casos, el material debe caracterizarse adecuadamente, *como el acristalamiento o 'muro de aire'*, respectivamente (figura 3C).
- Sombreado: Es importante incluir el contexto en el modelo térmico, debido a que puede influir en los niveles de radiación y vientos dominantes que reciben las zonas. En este ejercicio, se modeló el volumen de una vivienda vecina con 'boxes', ya que podría afectar los resultados de la simulación (figura 3D).
- Suelo: Es importante colocar una superficie definida como suelo, ya que ésta simulará una superficie de tierra; en caso contrario, la base de las zonas se reconocerá como entrepiso (figura 3E).

Superficies adiabáticas: Son aquellas que no permiten el intercambio de flujo de calor entre zonas. En este caso, la vivienda no cuenta con superficies adiabáticas

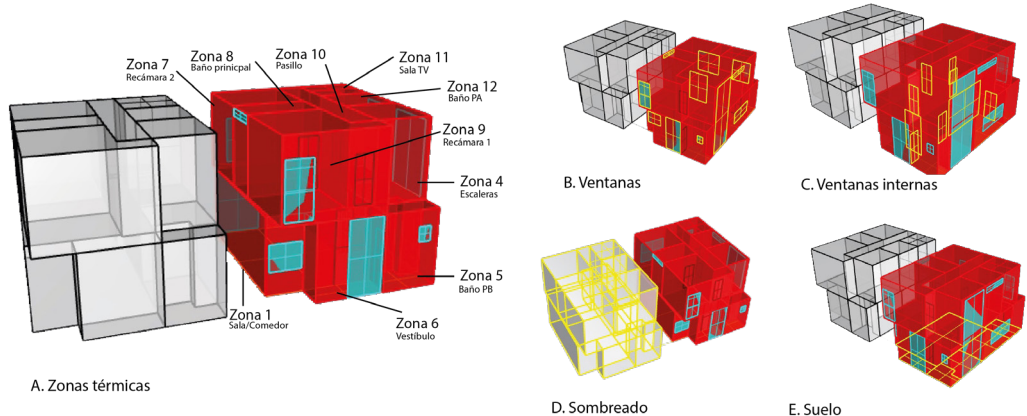


FIGURA 3. MODELO TÉRMICO PREPARADO EN RHINOCEROS PARA LA POSTERIOR SIMULACIÓN ENERGÉTICA EN CLIMATESTUDIO.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

A continuación, se configuran las cargas internas de cada zona (tabla 1). En este ejercicio, se aplicó la tipología “Vivienda unifamiliar aislada” a todas las zonas. Posteriormente, se modificó el apartado de densidad de ocupación (tabla 1); el horario de ocupación utilizado fue el “Residencial” (figura 4A), a excepción del área de cocina (figura 4B). Respecto al apartado de equipos, se especificó el consumo eléctrico de los electrodomésticos, en función del área de cada zona. Asimismo, se debe configurar el apartado de iluminación, según la densidad de potencia eléctrica y considerando si se utiliza algún sistema de atenuación, *como el continuo o escalonado*. El horario de uso de la iluminación fue el “Residencial” en todas las zonas (figura 4C), a excepción del área de cocina (figura 4D). Respecto al uso de agua caliente, zonas como el área de lavado, el baño en planta baja, el baño principal y el baño planta alta, se configuraron con el calendario “Residencial” (figura 4E); mientras que la cocina se configuró con el “Horario de Cocina” (figura 4F). Se uti-

lizó un coeficiente de rendimiento, *COP* de 1 y una “tarifa por persona” en 0.00167 (tabla 1). En el apartado de “Acondicionamiento” se consideró lo siguiente para todas las zonas: punto de ajuste de calefacción a una temperatura de 19 °C y punto de ajuste de refrigeración a una temperatura de 26 °C; en ambos casos con un horario ‘siempre encendido’. Esto último para verificar que la vivienda estuviera en comodidad térmica; en caso de que la vivienda mantuviera una temperatura de comodidad por el diseño arquitectónico en sí mismo, los sistemas de calefacción y climatización se mantendrían apagados. En el apartado “Ventilación mecánica” se mantuvo el horario de uso ‘siempre encendido’, con un aire fresco mínimo por persona de 8.3333 litros por segundo por persona (l/s/p). En el apartado de “Ventilación natural” el punto de ajuste se estableció en 22 °C y se activó la opción ventilación cruzada con un horario ‘siempre encendido’. Ambos ajustes de ventilación se utilizaron para todas las zonas.

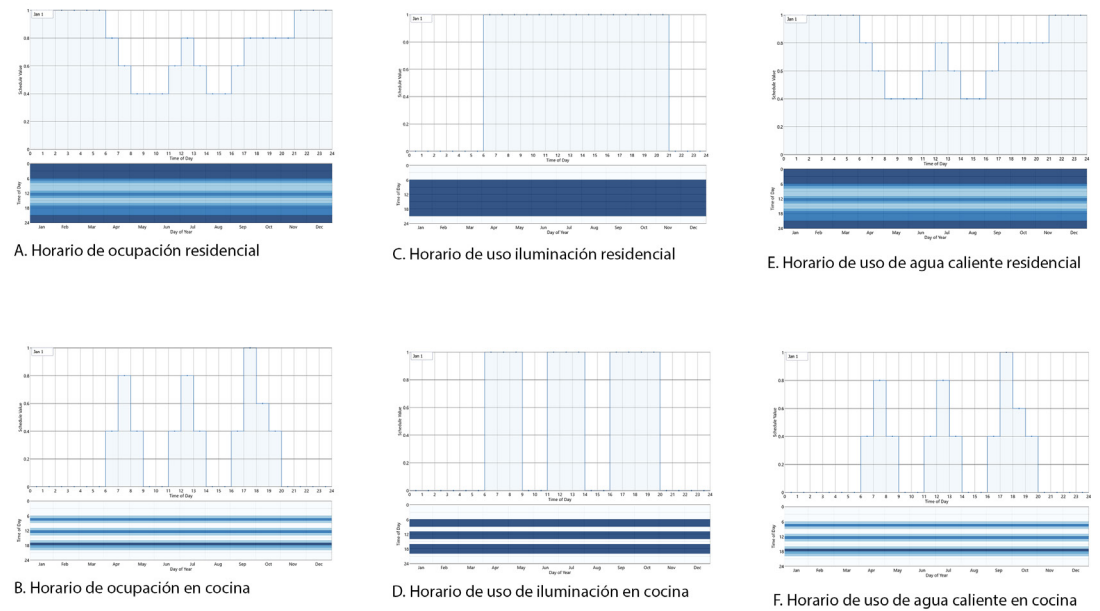


FIGURA 4. HORARIOS DE OCUPACIÓN Y USO PARA LA CONFIGURACIÓN DE CARGAS INTERNAS.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

TABLA 1. CARGAS INTERNAS POR ZONA.

#	Zona	Densidad de ocupación (P/m²)	Cargas				
			Densidad de Potencia Eléctrica en Equipamiento (W/m²)	Densidad de Potencia Eléctrica en Iluminación (W/m²)	Zona	Agua caliente	
						COP	Tasa de flujo por persona
1	Sala/comedor	0.17	4.01	3.9			
2	Área de lavado	0.29	202.35	2.93	x	1	0.00167
3	Cocina	0.54	171.45	4.09	x	1	0.00167
4	Escaleras	0.28	0	4.66			
5	Baño PB	0.44	0	3.37	x	1	0.00167
6	Vestíbulo	1.7	0	3.84			
7	Recámara 2	0.25	9.97	4.34			
8	Baño principal	0.29	0	3.11	x	1	0.00167
9	Recámara 1	0.58	8.81	5.64			
10	Pasillo	0.64	0	4.38			
11	Sala TV	0.27	0	3.71			
12	Baño PA	0.27	0	3.71	x	1	0.00167

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Para el caso base se asignaron los siguientes sistemas constructivos comúnmente utilizados en la región: muros de block de concreto ligero de 0.15 m de grosor, con recubrimiento de mortero en ambos lados; losa de concreto reforzado con block de concreto ligero de 0.20 m de espesor, con una capa de mortero hacia el exterior y estuco hacia el interior; entepiso de concreto

de 0.20 m de espesor, con baldosa de arcilla en la parte superior y estuco en la inferior; piso en contacto con el terreno de concreto de 0.30 m de espesor. Los sistemas de acristalamiento consistieron en vidrio sencillo de 0.006 m. La tabla 2 resume los valores asignados para los sistemas constructivos.

TABLA 2. PROPIEDADES TÉRMICAS DE LA ENVOLVENTE DE LA VIVIENDA.

Componente	Valor-U (W/m2K)	Valor-R (m2K/W)	Capacitancia	Energía	Carbono
			Térmica (kJ/K/m2)	Incorporada (MJ/m2)	Incorporado (kgCO2/m2)
Muros	2.01	0.328	119.424	0	0
Losa	2.49	0.232	525.722	921.6	95.04
Entepiso	1.759	0.399	226.789	140.4	19.8
Sistemas de acristalamiento	5.894	0.905	0.913	225	13.65
Piso en contacto con el terreno	3.125	0.15	684	540	72

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Finalmente, se especificaron los costos de electricidad, refrigeración y calefacción, según la tarifa básica de CFE de la zona metropolitana de Puebla: \$0.882. Para el costo de agua caliente se utilizó una tarifa media de gas de \$0.476. En cuanto a las emisiones de CO₂ se consideró 0.231 kg/kWh para agua caliente y 0.612 kg/kWh para refrigeración, calefacción y electricidad.

Adecuaciones en la vivienda

Después de realizar las simulaciones energéticas del caso base, se procedió a implementar las siguientes adecuaciones a la vivienda: se utilizó aislamiento térmico en la envolvente (tabla 3), y se modificó el diseño de ventanas (figura 5).

TABLA 3. COMPARATIVA DE PROPIEDADES TÉRMICAS DE LOS SISTEMAS CONSTRUCTIVOS.

Caso	Aislamiento térmico en muros, Valor U (W/m2K)	Aislamiento térmico en losas, Valor U (W/m2K)	Aislamiento térmico en sistemas de acristalamiento, Valor U (W/m2k)
Caso Base	2.01	2.49	5.894
Caso Final	0.735	0.653	2.67

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

La finalidad es comparar el impacto de las siguientes adecuaciones en el rendimiento energético de la vivienda.

- Aislamiento térmico en muros: Se implementó un material de espuma termoplástica rígida o Poliestireno Expandido (EPS). Gracias a su bajo impacto de carbono y a su resistencia a la compresión, contribuye a mejorar la comodidad térmica y a reducir el desperdicio en la cadena de suministros. Un factor muy importante es el posicionamiento de las capas de espesor, ya que de eso dependerá el resultado al interior de los espacios. En este caso, el EPS se colocó como la segunda capa al exterior, sólo después del acabado final.
- Aislamiento térmico en losas: Se implementó espuma de poliuretano en la losa de azotea, con el fin de proporcionar aislamiento térmico que permita reducir las cargas de calefacción y climatización. Similar al caso en muros, el aislante se colocó como la segunda capa al exterior, sólo después del acabado final.
- Sistemas de acristalamiento: En climas de baja temperatura, el sistema de acristalamiento puede significar un menor gasto en el sistema de calefacción que, además reducirá el uso de radiadores bajo las ventanas gracias a que se generarán zonas con mayor calor debido a la transmitancia térmica (Valor U) del vidrio. En el caso de climas calurosos, se puede reducir el uso del sistema de climatización al disminuir las ganancias de calor por la radiación solar que proviene del exterior, logrando así mantener la vivienda más fresca. En la adecuación del caso de estudio, se reemplazó el vidrio simple por uno doble que tiene mejor comportamiento térmico o valor U. Se descartó un triple acristalamiento porque reduce con-

siderablemente la transmitancia de la luz natural.

- Diseño de ventanas: En muchas ocasiones se piensa que para tener un mayor ahorro energético es necesario implementar estrategias complejas, sin embargo, estos cambios se pueden lograr con estrategias tan simples como el diseño, ubicación y tamaño de las ventanas. Considerando las recomendaciones del Manual para la vivienda sustentable CONAVI, se rediseñaron las ventanas, *hacia el sur, este, oeste y sureste* con dimensiones moderadas para evitar el sobrecalentamiento (figura 5). El objetivo principal de esta estrategia es aprovechar la radiación solar para calentar la vivienda en los meses con temperaturas más bajas y evitar el uso de calefacción; a la vez, mantener la vivienda fresca en los meses con temperaturas más altas y disminuir el uso de climatización.
- Ventilación cruzada: Esta estrategia, gratuita, natural y renovable, permite el paso de aire fresco hacia el interior de los espacios con el objetivo de alcanzar la comodidad térmica interior. En este estudio, se compara el caso base sin ventilación cruzada, respecto al caso final con ventilación cruzada.

A. Diseño de ventanas en caso base



B. Diseño de ventanas en caso final



FIGURA 5. DISEÑO DE VENTANAS.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

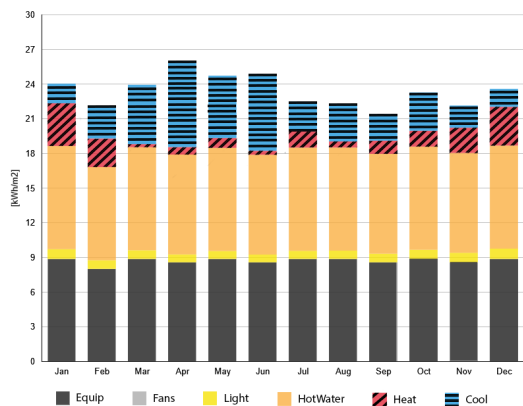
RESULTADOS

En general, las estrategias implementadas arrojaron mejoras significativas. Es importante mencionar que cada una de las estrategias fue aplicada individualmente para evaluar su impacto en el rendimiento de la vivienda. Posteriormente, en el caso final se aplicaron todas las estrategias conjuntas para la comparativa energética final.

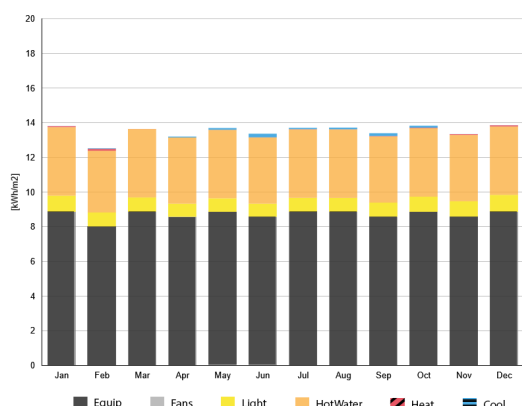
Con base en lo anterior, la estrategia de ventilación cruzada consiguió que el costo energético disminuyera de \$205/m² a \$126/m². La estrategia de aislamiento térmico EPS en muros permitió que el valor U disminuyera de 2.01 a 0.735, lo que se tradujo en una reducción de más del 50% en el costo energético: de \$205/m² disminuyó a \$197/m². La estrategia de aislamiento térmico en losa permitió que el valor U redujera de 2.49 a 0.653, lo que consiguió que el costo energético disminuyera de \$205/m² a \$197/m². El cambio en el sistema de acristalamiento simple por uno doble se tradujo en una disminución del valor U de 5.894 a 2.67, lo que consiguió una disminución del costo energético de \$205/m² a \$201/m².

Las estrategias anteriores se implementaron conjuntamente en el caso base, al que se modificó el tamaño y la forma de las ventanas. Así, se pudo observar una reducción del costo de \$205/m² a \$124/m² en el caso final. Cabe destacar que se obtuvo una disminución considerable en las cargas de energía para climatización, principalmente en los meses de abril y junio (figura 6); éstas se pueden observar mayormente en la zona de sala/comedor, con una disminución de 329 KWh a 12 KWh, y en la zona del baño en planta baja, con una disminución de 331 KWh a 4 KWh (figura 7).

Además, se observó una disminución en las cargas de energía para calefacción, principalmente en los meses de enero y diciembre (figura 6); en la zona de la cocina se consiguió una reducción de 1259 KWh a 14 KWh, y en la zona de la lavandería, con una reducción de 1412 KWh a 46 KWh (figura 7). Esto nos demuestra que la aplicación de diferentes estrategias en conjunto beneficia de forma considerable el costo energético de una vivienda unifamiliar al igual que la comodidad térmica en el interior del espacio.



A. Intensidad del uso de energía del caso base



B. Intensidad del uso de energía del caso final

FIGURA 6. GRÁFICAS DE INTENSIDAD DEL USO DE ENERGÍA.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Respecto a las emisiones de CO_2 , en el caso base se emitieron $125 \text{ KgCO}_2/\text{m}^2$; con la estrategia de aislamiento térmico en muros se consiguió una reducción a $124 \text{ KgCO}_2/\text{m}^2$; con la estrategia de aislamiento térmico en

losas se obtuvieron $125 \text{ KgCO}_2/\text{m}^2$; con el sistema de acristalamiento se redujeron a $123 \text{ KgCO}_2/\text{m}^2$; el cambio más notorio se reflejó en el caso final, ya que su valor se redujo de $125 \text{ KgCO}_2/\text{m}^2$ a $81 \text{ KgCO}_2/\text{m}^2$.

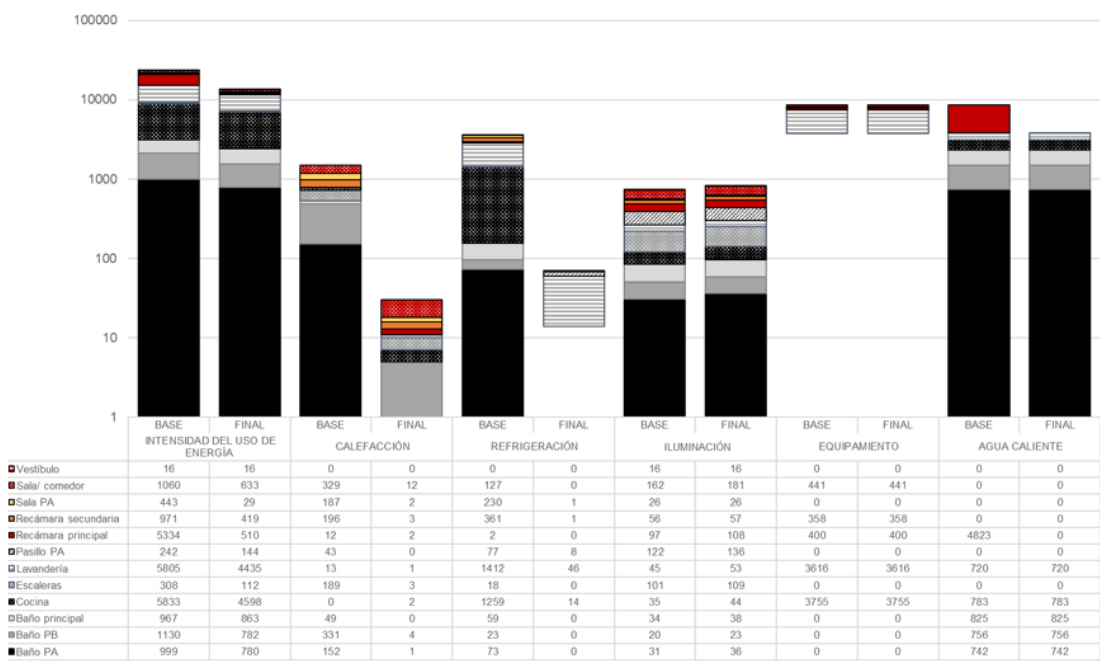


FIGURA 7. RESULTADOS POR ZONAS: CASO BASE EN COMPARACIÓN CON EL CASO FINAL.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

CONCLUSIONES

Con este análisis del rendimiento energético de una vivienda unifamiliar, desarrollado mediante simulaciones computacionales, se espera mejorar la comodidad térmica del espacio interior y la calidad de vida del usuario. Se observa que la implementación de estrategias de diseño de la envolvente y de diseño pasivo impacta de manera significativa la intensidad del uso de energía anual, principalmente respecto a las pérdidas y ganancias de climatización y calefacción. La ventilación cruzada es la estrategia que tuvo un mayor impacto en el ahorro energético. Por tanto, se resalta la importancia de orientar adecuadamente las ventanas, hacia los vientos dominantes. En este aspecto, la información de los archivos climáticos es crucial y permite realizar análisis más acotados al sitio de emplazamiento de los proyectos.

Se concluye también que los sistemas constructivos con mejor capacidad aislante no sólo reducen el consumo energético sino también los costos y las emisiones de carbono al ambiente. El uso de programas computacionales permite tener un mejor acercamiento a la comprensión del rendimiento energético de las viviendas. A la vez, permite comparar diferentes estrategias de diseño en la fase conceptual de los proyectos, lo que se podrá ver reflejado en las decisiones arquitectónicas y en las viviendas construidas. Este tipo de análisis permite a los estudiantes y arquitectos tomar consciencia y acciones para sus futuros proyectos, de modo que el diseño de las viviendas se desarrolle de manera integral, considerando la comodidad térmica de los usuarios y el impacto en el medio ambiente. Hoy es necesario incorporar el conocimiento y aplicación de estas estrategias en el quehacer del arquitecto o profesional de disciplinas afines.

Este tipo de análisis

**PERMITE
A LOS
ESTUDIANTES Y
ARQUITECTOS**

tomar

**CONSCIENCIA
Y ACCIONES PARA
FUTUROS
PROYECTOS,**

de modo que

EL DISEÑO

**DE LAS
VIVIENDAS**

se desarrolle

DE MANERA INTEGRAL,
considerando la

COMODIDAD

TÉRMICA

DE LOS USUARIOS

y el

**IMPACTO EN EL
MEDIO AMBIENTE.**

FUENTES DE CONSULTA

Buckley, N. *et al.*, (2021), "Using urban building energy modelling (UBEM) to support the new European Union's Green Deal: Case study of Dublin Ireland", *Energy and Buildings*, 247. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111115>.

Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI) (2015), Vivienda sustentable en México, Hábitat sustentable. CONAVI-SEMARNAT. Disponible en: https://www.conavi.gob.mx/images/documentos/sustentabilidad/2b_Vivienda_Sutentable_en_Mexico.pdf, consultado el 4 de abril de 2023.

Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI) (2021), Manual para la Vivienda Sustentable. CONAVI-SEDATU. Disponible en <https://www.gob.mx/conavi/prensa/presento-la-conavi-manuales-para-la-construccion-de-viviendas-sustentables?idiom=es>, consultado el 6 de febrero de 2023.

Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI) (2022), Estrategias de diseño arquitectónico con enfoque bioclimático. CONAVI-SEDATU. Disponible en [https://siesco.conavi.gob.mx/doc/tecnicos/disenio/Estrategias de Diseño Arquitectónico.pdf?fbclid=IwAR2N8IkFobofhoCLq2pdZGoeB4xXcQc2zBbBr7T6heVuty4YeUrov4Nmegg](https://siesco.conavi.gob.mx/doc/tecnicos/disenio/Estrategias%20de%20Dise%C3%B1o%20Arquitect%C3%B3nico.pdf?fbclid=IwAR2N8IkFobofhoCLq2pdZGoeB4xXcQc2zBbBr7T6heVuty4YeUrov4Nmegg), consultado el 2 de febrero de 2023.

Constanzo, V. *et al.* (2022), "Optical characterization of historical coloured stained glasses in winter gardens and their modelling in daylight availability simulations", *Solar Energy*, 243, pp. 22-34. Doi: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.07.043>.

DOE (U.S. Department of Energy) (2016), EnergyPlus Version 8.5 Documentation. Engineering reference, EnergyPlus Version 8.5 Docum. California: LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory). Doi: <https://doi.org/http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>.

Elaouzy, Y. and El Fadar, A. (2022), "Energy, economic and environmental benefits of integrating passive design strategies into buildings: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167(May), p. 112828. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112828>.

Gerui, S. *et al.*, (2023), "Daylighting performance assessment of traditional skywell dwellings: A case study in Fujian, China", *Journal of Building Engineering*, 68, p. 106028. Doi: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106028>.

Gobierno de Navarra (2023), Clasificación climática de Köppen, Meteo Navarra. Disponible en <http://meteo.navarra.es/definiciones/koppen.cfm#:~:text=Divide los climas del mundo,de 2 o 3 letras,consultado el 1 de mayo de 2023>.

Hou, J. *et al.*, (2022), "A study on influencing factors of optimum insulation thickness of exterior walls for rural traditional dwellings in northeast of Sichuan hills, China", *Case Studies in Construction Materials*, 16, p. e01033. Doi: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01033>.

Jakubiec, A. and Reinhart, C.F. (2011), "DIVA 2.0: Integrating daylight and thermal simulations using Rhinoceros 3D, Daysim and EnergyPlus", in Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association. Sydney: IBPSA (International Building Performance Simulation Association), pp. 2202-2209.

Le, D.M. *et al.* (2022), "Multi-criteria decision making for adaptive façade optimal design in varied climates: Energy, daylight, occupants' comfort, and outdoor view analysis", *Building and Environment*, 223(May), p. 109479. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109479>.

Mongue Palma, R. *et al.*, (2023), "Extending the concept of high-performance buildings to existing dwellings", *Energy and Buildings*, 296, p. 113431. Doi: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113431>.

Pan, Y. *et al.*, (2023), "Building energy simulation and its application for building performance optimization: A review of methods, tools, and case studies", *Advances in Applied Energy*, 10(April), p. 100135. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2023.100135>.

SENER-CONUEE-INEGI (2018), Encuesta nacional sobre consumo de energéticos en viviendas particulares.

Solemma LLC (2021), ClimateStudio User Guide, ClimateStudio. Available at: <https://climatestudiodocs.com/index.html>, accessed: 13 October 2021.

Sorooshnia, E. *et al.*, (2023), "A novel approach for optimized design of low-E windows and visual comfort for residential spaces", *Energy and Built Environment*, In press. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2023.08.002>.

University of California Berkeley (2022), EnergyPlus Weather Database, CBE Climate Tool. Available at: <https://clima.cbe.berkeley.edu/>, accessed: 10 January 2023.

Vasco, D. *et al.* (2017), "Thermal simulation of a social dwelling in Chile: Effect of the thermal zone and the temperature-dependant thermophysical properties of light envelope materials", *Applied Thermal Engineering*, 112, pp. 771-783. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.10.130>.