



## ARTÍCULO ORIGINAL

## **Análisis comparativo de modelos adaptativos para evaluar el confort térmico y la eficiencia energética de oficinas en un clima tropical de Misantla, Veracruz**

**Soraya Guzmán-Gerón<sup>1</sup>, Jorge Roa-Díaz<sup>1</sup>, Luis Carlos Sandoval-Herazo<sup>2,3</sup>, Luis Guillermo Carreto-Hernandez<sup>4</sup> Ariel Francisco-Hernandez<sup>5</sup>, Wendy Guadalupe Báez-García<sup>5\*</sup>**

<sup>1</sup> Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Misantla, Km 1.8 Carretera a Loma del Cojolite, Misantla 93821, Veracruz, México.

<sup>2</sup> Wetlands and Environmental Sustainability Laboratory, Division of Graduate Studies and Research, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Misantla, Km 1.8 Carretera a Loma Del Cojolite, Misantla 93821, Veracruz, México.

<sup>3</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad de Sucre, Sincelejo 700001, Colombia

<sup>4</sup> Universidad Tecnológica de Gutiérrez Zamora, Carretera Gutiérrez Zamora - Boca de Lima km 2.5, 93557, Gutiérrez Zamora, México.

<sup>5</sup> Tecnológico Nacional de México, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira s/n, Colonia Palmira, Cuernavaca 62490, Morelos, México.

Recepción 15 de noviembre 2024. Aceptación 30 de noviembre de 2024.

**PALABRAS CLAVE**

Confort térmico  
Eficiencia energética  
Modelos de confort  
térmico adaptativos  
Climas tropicales

**Resumen**

El confort térmico en espacios interiores es crucial para el bienestar de los ocupantes. No obstante, mantener este confort puede resultar en un aumento significativo del consumo energético. Por ello, es fundamental optimizar los sistemas de climatización para mejorar la eficiencia energética sin comprometer el bienestar térmico de los usuarios. Este estudio evalúa modelos adaptativos para analizar el ahorro energético y el confort térmico en un espacio de oficina en Misantla, Veracruz, bajo un clima tropical Aw. Se empleó el modelo geométrico de referencia de los reportes técnicos de BESTest para modelar una oficina típica. Los modelos adaptativos de López-Pérez et al., Nicol, de Dear y Brager, ASHRAE 55, CIBSE GUIDE A y CEN Standard fueron comparados con el modelo de referencia, configurado con un Setpoint de 25°C. Los resultados mostraron ahorros energéticos de 24.30%, 9.80%, 10.60%, 14.00%, 17.20% y 23.10%, respectivamente. El confort térmico se evaluó mediante el modelo estático PMV/PPD, considerando días representativos de cada estación del año. Como conclusión, todos los modelos presentaron un PPD inferior al 30% y un PMV correspondiente a una sensación de "ligeramente fresco". El modelo de López-Pérez et al., destacó por su mejor rendimiento en términos de adaptabilidad y ahorro energético, seguido por el modelo CEN. Los modelos adaptativos demostraron ser efectivos para optimizar el consumo energético sin afectar el confort térmico de los ocupantes.

**KEYWORDS**

Thermal comfort  
 Energy efficiency  
 Adaptive models  
 Static models  
 Tropical climates

**Abstract**

Thermal comfort in indoor spaces is crucial for the well-being of occupants. However, maintaining this comfort can result in a significant increase in energy consumption. Therefore, it is essential to optimize air conditioning systems to improve energy efficiency without compromising the thermal well-being of users. This study evaluates adaptive models to analyze energy savings and thermal comfort in an office space in Misantla, Veracruz, under a tropical Aw climate. The geometric reference model from the BESTest technical reports was used to model a typical office. The adaptive models of López-Pérez et al., Nicol, de Dear and Brager, ASHRAE 55, CIBSE GUIDE A, and CEN Standard were compared with the reference model, set to a 25°C setpoint. The results showed energy savings of 24.30%, 9.80%, 10.60%, 14.00%, 17.20%, and 23.10%, respectively. Thermal comfort was evaluated using the static PMV/PPD model, considering representative days from each year's season. As a conclusion, all models showed a PPD lower than 30% and a PMV corresponding to a "slightly cool" sensation. The López-Pérez et al. model stood out for its better performance in terms of adaptability and energy savings, followed by the CEN model. Adaptive models proved to be effective in optimizing energy consumption without affecting the thermal comfort of the occupants.

**Introducción**

El confort térmico en los espacios interiores es esencial para la salud y la productividad de los ocupantes (Wang et al., 2025), considerando que las personas permanecen aproximadamente el 90% de su tiempo en ambientes interiores (Zomorodian et al., 2016). En climas extremos, las altas temperaturas y la radiación solar representan desafíos significativos para mantener condiciones térmicas óptimas, con posibles impactos en la calidad de vida.

Diversos estudios han analizado estrategias pasivas para optimizar el confort térmico en edificaciones (Carreto-Hernández et al., 2022, 2023, 2024; Báez-García et al., 2024), concluyendo que, si bien estas estrategias pueden ser efectivas, no son completamente autosuficientes. Por consiguiente, es necesario complementar dichas medidas con sistemas de Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado (HVAC) para abordar de manera integral los desafíos asociados al control térmico. No obstante, el funcionamiento de estos sistemas implica altos costos energéticos y un impacto ambiental significativo (Zakka & Lee, 2024). En este contexto, una gestión eficiente de los sistemas HVAC resulta crucial para maximizar el confort térmico, minimizar el consumo energético y promover prácticas sostenibles a largo plazo (Upasani et al., 2024).

Para abordar este desafío, se han realizado investigaciones centradas en el confort térmico óptimo de los ocupantes y su impacto en el consumo energético (Taleghani, Tenpierik, Kurvers, & van den Dobbelssteen, 2013). Entre estas, se encuentra el estudio de modelos de confort térmico que permitan considerar las respuestas de los ocupantes al entorno establecido (Nicol & Humphreys, 2002; Indraganti, Ooka, Rijal, & Brager, 2014; Oropeza-Pérez, Petzold-Rodríguez, & Bonilla-López, 2017). Los modelos de confort térmico se dividen en dos categorías: estáticos y adaptativos. Los modelos de confort térmico estático, desarrollados por Povl Ole Fanger en la década de 1970, sostienen que el sistema de termorregulación humana es altamente eficaz, logrando un equilibrio

térmico dentro de amplios rangos de variables ambientales, incluso sin garantizar confort (Djongyang, Tchinda, & Njomo, 2010; Charles, 2012). Fanger realizó su estudio en entornos controlados mediante una cámara térmica, donde predijo la sensación térmica de 1,296 personas (Fanger, 1970). Este estudio dio lugar a los modelos Voto Medio Predicho (PMV) y Porcentaje Predicho de Insatisfechos (PPD), que fueron fundamentales para establecer estándares internacionales como ASHRAE 55 (ASHRAE, 2013), CEN Standard (CEN, 2007) y CIBSE (CIBSE, 2006). En contraste, los modelos de confort térmico adaptativos proponen que, ante un cambio que cause malestar, las personas tienden a ajustar su comportamiento para restablecer el confort (Humphreys, 1997; Nicol et al., 2012).

Los primeros estudios sobre modelos adaptativos, como los de Nicol y Humphreys (Nicol & Humphreys, 1973) y de Dear y Brager (de Dear & Brager, 1998), se centraron en analizar el comportamiento de los ocupantes y la aceptabilidad del ambiente térmico. Estas investigaciones tienen como objetivo optimizar la eficiencia de los sistemas HVAC y satisfacer las necesidades de confort térmico de los ocupantes en espacios cerrados.

En la actualidad, el desarrollo y la implementación de modelos de confort térmico son cruciales para la optimización de los ambientes interiores y la mejora de la calidad de vida de los ocupantes de los edificios. A nivel global, se han desarrollado diversos modelos que abordan las condiciones climáticas, socioeconómicas y culturales específicas de cada región (Indraganti, Ooka, Rijal, & Brager, 2014; Manu, Shukla, Rawal, Thomas, & de Dear, 2016; Rijal, Humphreys, & Nicol, 2019; Jiao, Yu, Yu, Wang, & Wei, 2020).

Por ejemplo, Nicol y Humphreys (Nicol & Humphreys, 2002) desarrollaron un modelo de confort térmico adaptativo mediante pruebas de campo, demostrando que la temperatura de confort interior varía significativamente entre diferentes zonas climáticas. Sin embargo, también evidenciaron que las personas tienden a adaptarse a los

cambios ambientales y estacionales. Por otro lado, McCartney y Nicol (McCartney & Nicol, 2002) desarrollaron un algoritmo de control adaptativo (ACA) como alternativa a los controles de temperatura fija en edificios y demostraron que el ACA puede ahorrar energía en los sistemas de control climático sin afectar el confort térmico percibido por los ocupantes. De Dear y Brager (de Dear & Brager, 1998) estudiaron cómo las preferencias térmicas de los ocupantes se ajustan a las condiciones interiores y exteriores, confirmando que las temperaturas óptimas varían según el entorno. Además, identificaron que los ocupantes de edificios con Ventilación Natural (VN) toleran un rango más amplio de temperaturas debido a la adaptación psicológica y comportamental. Nicol (Nicol, 2004) desarrolló un modelo de confort adaptativo para climas tropicales, utilizando los resultados de encuestas locales sobre las preferencias térmicas de los ocupantes, con el fin de mejorar la comprensión del confort térmico en estos entornos. En México, Oropeza-Pérez et al. (Oropeza-Pérez, Petzold-Rodríguez, & Bonilla-López, 2017) desarrollaron un modelo de confort térmico adaptativo para las regiones climáticas de México, considerando tanto edificios con Aire Acondicionado (AC) como sin él. Encontraron que, en edificios con AC, se puede aumentar la temperatura del termostato manteniendo el confort, mientras que, en edificios sin aire acondicionado, el confort mejora si los ocupantes controlan su entorno usando técnicas pasivas como VN y Control Solar. A su vez, López-Pérez et al. (López-Pérez et al., 2019) desarrollaron un modelo de confort térmico adaptativo para edificios educativos en clima tropical Aw, considerando AC y VN. El modelo mostró que los ocupantes preferían temperaturas de confort más altas que los estándares actuales y que, al aumentar la temperatura de confort, se podría mejorar la satisfacción y ahorrar energía, tomando en cuenta la adaptabilidad térmica de los ocupantes.

Los modelos de confort térmico adaptativo han demostrado ser herramientas clave para mejorar tanto el bienestar de los ocupantes como la eficiencia energética en edificios. A través de la adaptación a las condiciones ambientales y la flexibilidad de las preferencias de los usuarios, estos modelos permiten optimizar el uso de recursos energéticos sin comprometer el confort. En particular, estudios previos han mostrado que ajustar las condiciones térmicas según la adaptabilidad de los ocupantes no solo puede incrementar el nivel de satisfacción, sino también reducir el consumo energético, especialmente en climas cálidos y tropicales. Esto resalta la importancia de integrar enfoques adaptativos en la planificación y diseño de sistemas de climatización y ventilación.

En este contexto, el estudio se centra en un análisis comparativo de modelos de confort térmico adaptativo aplicados a una oficina ubicada en el clima tropical de Misantla. Se utiliza el modelo de referencia BESTest para simular un ejemplo de oficina típica. Se evalúa el confort térmico mediante el modelo PMV/PPD, considerando las condiciones térmicas percibidas por los ocupantes y su relación con el consumo energético. Además, se analiza el impacto de incorporar modelos adaptativos en la mejora de la eficiencia energética, evaluando su capacidad para ajustar las condiciones interiores en función de las preferencias térmicas de los ocupantes y las variaciones ambientales.

## Materiales y métodos

La metodología de la presente investigación se dividió en tres etapas principales. En primer lugar, se llevó a cabo la verificación del modelo base, utilizando el modelo 600 del informe BESTest como referencia, lo que permitió garantizar la funcionalidad y precisión de la plataforma empleada. Posteriormente, en la segunda etapa, se implementaron modelos de confort térmico adaptativo, considerando un modelo local, dos modelos ampliamente utilizados en la literatura y tres estándares reconocidos, ajustados a las condiciones climáticas tropicales de Misantla, Veracruz. Finalmente, en la tercera etapa, se analizaron los resultados obtenidos, evaluando el potencial de estos modelos para reducir el consumo energético y mejorar las condiciones de confort térmico en la habitación estudiada.

### Modelo BESTest 600

El modelo BESTest 600 corresponde a una habitación con dimensiones de 2.7 m de altura, 6 m de ancho y 8 m de largo. Esta habitación está equipada con dos ventanas orientadas al sur, cada una con un tamaño de 3 x 2 m y un vidrio de espesor de 3.175 mm. Este modelo es adecuado para simular una habitación de oficina, debido a sus características de tamaño y diseño, las cuales fueron tomadas del modelo descrito en los reportes técnicos "International Energy Agency Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic Method" (Judkoff & Neymark, 1995) y "EnergyPlus Testing with Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests from ANSI/ASHRAE Standard 140-2011" (U.S. Department of Energy, 2011). La simulación se realizó bajo las condiciones climáticas de Denver, Colorado, dado que las pruebas de BESTest se llevaron a cabo en este entorno. Las condiciones climáticas se modelaron en formato TMY (Typical Meteorological Year), que se basa en un promedio de datos meteorológicos recopilados durante un período de 5 a 10 años, proporcionando una representación precisa de las condiciones climáticas anuales. Se consideró una infiltración de aire de 0.5 Cambios de Aire por Hora (ACH), lo cual representa la cantidad de aire exterior que ingresa a la habitación debido a filtraciones. Asimismo, se incluyeron cargas térmicas internas de 200 W en la habitación, distribuidas en un 60% de energía radiativa y un 40% de energía convectiva. El control térmico de la habitación se estableció con un Setpoint de 20 °C para calefacción y 27 °C para enfriamiento. Las especificaciones completas de los materiales utilizados en la simulación se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Especificación de los materiales

Elemento	$\lambda$ ( $\frac{\text{kJ}}{\text{hmK}}$ )	$C_p$ ( $\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$ )	$\rho$ ( $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ )	$R$ ( $\frac{\text{hm}^2\text{K}}{\text{kJ}}$ )	$d$ ( $\text{m}^2$ )
<b>Paredes</b>					
Bloque de concreto	1.836	1.00	1400		0.1000
Aislamiento de espuma	0.144	1.40	10		0.0615
Revestimiento de madera	0.504	0.9	530		0.0090
<b>Suelo</b>					
Concreto débil	4.068	1.00	1400		0.0800
Aislamiento				90.81	1.0070
<b>Techo</b>					
Cartón de yeso	0.576	0.84	950		0.0100
Fibra de vidrio	0.144	0.84	950		0.1118
Cubierta de techo	0.504	0.90	530		0.0190

El modelo geométrico de la habitación fue construido en el software SketchUp Pro-17, considerando las dimensiones y la orientación hacia el sur. La Figura 1 muestra el modelo de la habitación en SketchUp. Posteriormente, utilizando la herramienta de extensión para TRNSYS 17, el modelo fue transferido a Type 56, donde se realizaron los ajustes correspondientes según las especificaciones necesarias para la simulación térmica. La Figura 2 presenta la plataforma de simulación en TRNSYS, donde se configuraron y modificaron los parámetros para la simulación.

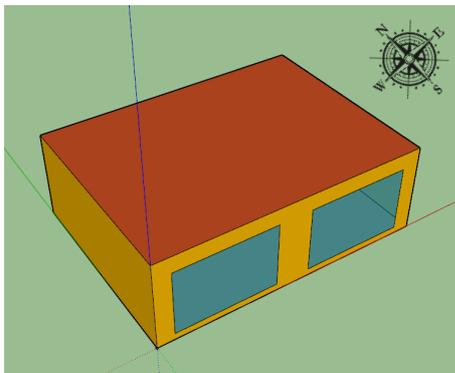


Figura 1. Modelo geométrico BESTest construido en SketchUp

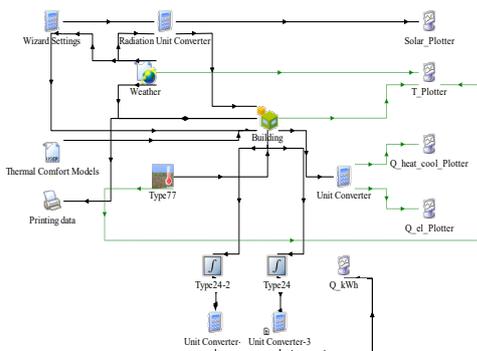


Figura 2. Plataforma de simulación en TRNSYS 17

Los resultados obtenidos en el reporte BESTest, a partir de simulaciones realizadas con el software EnergyPlus, indicaron una carga térmica de calefacción de 5.7 MWh y una carga de enfriamiento de 7.0 MWh. Por otro lado, los resultados obtenidos en la presente investigación, utilizando la plataforma TRNSYS, mostraron una carga térmica de calefacción de 5.4 MWh y una carga de enfriamiento de 6.9 MWh. Las diferencias porcentuales entre ambos conjuntos de resultados fueron del 5% para calefacción y del 1% para enfriamiento, lo que sugiere que la plataforma de simulación utilizada en este estudio está funcionando de manera adecuada y consistente con los datos reportados.

### Caso de estudio

Este estudio se centra en analizar el comportamiento térmico y energético de una oficina típica ubicada en Misantla, Veracruz, utilizando como referencia el modelo BESTest 600. Misantla es una ciudad ubicada en el estado de Veracruz, México, con coordenadas geográficas de 19.58° N de latitud y 96.97° W de longitud. Se encuentra a

aproximadamente 75 kilómetros del litoral del Golfo de México, en una región montañosa que forma parte de la Sierra de los Tuxtlas. Misantla se caracteriza por un clima tropical subhúmedo, tipo Aw según la clasificación de Köppen. Este clima se distingue por la presencia de altas temperaturas y niveles elevados de humedad durante la mayor parte del año, lo que genera incomodidad térmica en los espacios interiores. Estas condiciones afectan directamente la demanda energética de los edificios, al incrementar la necesidad de refrigeración para mantener condiciones de confort adecuadas. En la Tabla 2 se muestran las condiciones climáticas mensuales de Misantla, Veracruz.

Tabla 2. Condiciones climáticas de Misantla Veracruz

Meses	T. Ambiente	Vel. Viento	H. Relativa	R. Solar
Enero	19.01	3.00	79.58	273.77
Febrero	20.32	3.00	79.91	322.28
Marzo	22.61	3.10	77.61	346.98
Abril	25.02	3.10	75.98	390.83
Abril	27.14	3.00	74.39	418.13
Mayo	27.20	2.91	77.73	436.81
Junio	27.39	2.80	76.50	423.27
Julio	27.52	2.69	76.02	398.09
Agosto	26.18	2.89	80.37	353.70
Septiembre	25.11	3.00	78.33	341.75
Octubre	21.85	3.01	80.20	314.29
Noviembre	20.15	2.90	79.68	264.67
<b>Prom. Anual</b>	<b>24.12</b>	<b>2.95</b>	<b>78.03</b>	<b>357.05</b>

### Modelos de confort térmico adaptativo

Existen dos tipos principales de modelos de confort térmico: el adaptativo y el estático. Por su parte, el modelo adaptativo se fundamenta en la capacidad de los ocupantes para adaptarse a las condiciones térmicas, relacionando el confort interior con las condiciones climáticas exteriores. El modelo estático se basa en condiciones constantes y controladas, considerando que el confort térmico depende de parámetros específicos como temperatura, humedad y nivel de actividad física. El análisis comparativo se centra en evaluar el potencial del modelo adaptativo (M.A) para mejorar el confort térmico y optimizar el consumo energético en una oficina ubicada en un clima tropical. Para ello, se emplea un modelo local mexicano propuesto por López-Pérez et al. (López-Pérez et al., 2019), el cual se presenta en la Ec. (1), junto con dos modelos ampliamente reconocidos en la literatura científica: el de Nicol (Nicol, 2004) y el de Dear y Brager (de Dear & Brager, 1998), cuyas ecuaciones se muestran en las Ec. (2) y (3). También se consideran los estándares internacionales ASHRAE 55 (ASHRAE, 2013), CIBSE Guide A (CIBSE, 2006) y CEN Standard (CEN, 2007), representados en las Ec. (4), (5) y (6). Estas ecuaciones proporcionan los criterios y parámetros necesarios

$$\text{M.A 1} \quad T_{comf} = 0.13T_{rm} + 22.7 \quad (1)$$

$$\text{M.A 2} \quad T_{comf} = 0.534T_{out} + 12.9 \quad (2)$$

$$\text{M.A 3} \quad T_{comf} = 0.04T_{out} + 22.6 \quad (3)$$

$$\text{M.A 4} \quad T_{comf} = 0.31T_{out} + 17.8 \quad (4)$$

$$\text{M.A 5} \quad T_{comf} = 0.09T_{rm} + 22.6 \quad (5)$$

$$\text{M.A 6} \quad T_{comf} = 0.33T_{rm} + 18.8 \quad (6)$$

La temperatura de confort, denotada como  $T_{comf}$  puede ser calculada de diversas formas según el modelo empleado. En

algunos casos, se obtiene a partir de la temperatura exterior  $T_{out}$ , mientras que en otros se determina mediante la temperatura media móvil  $T_{rm}$  utilizando la ecuación (7).

$$T_{rm(today)} = (\alpha)T_{rm(yesterday)} + (1 - \alpha)T_{m(today)} \quad (7)$$

Donde  $T_{rm(today)}$  y  $T_{rm(yesterday)}$  son las temperaturas medias móviles correspondientes a hoy y ayer, respectivamente, expresadas en grados Celsius. La  $T_{m(today)}$  es la temperatura media diaria exterior del día en grados Celsius, y el valor de  $\alpha$  se establece en 0.8.

La Tabla 3 presenta la temperatura de confort térmico en las condiciones climáticas de Misantla, Veracruz, de acuerdo con los modelos previamente mencionados.

Tabla 3. Temperaturas de confort térmico con los diferentes modelos adaptativos

Meses	M.A 1	M.A 2	M.A 3	M.A 4	M.A 5	M.A 6
Enero	25.17	23.05	23.36	23.69	24.31	25.07
Febrero	25.34	23.75	23.41	24.10	24.43	25.50
Marzo	25.64	24.97	23.50	24.81	24.63	26.26
Abril	25.95	26.26	23.60	25.56	24.85	27.06
Abril	26.23	27.39	23.69	26.21	25.04	27.76
Mayo	26.24	27.43	23.69	26.23	25.05	27.78
Junio	26.26	27.53	23.70	26.29	25.07	27.84
Julio	26.28	27.59	23.70	26.33	25.08	27.88
Agosto	26.10	26.88	23.65	25.92	24.96	27.44
Septiembre	25.96	26.31	23.60	25.58	24.86	27.09
Octubre	25.54	24.57	23.47	24.57	24.57	26.01
Noviembre	25.32	23.66	23.41	24.05	24.41	25.45
<b>Prom. Anual</b>	<b>25.84</b>	<b>25.78</b>	<b>23.56</b>	<b>25.28</b>	<b>24.77</b>	<b>26.76</b>

Adicionalmente, se emplean modelos estáticos para analizar el confort térmico en ambientes controlados y se basan en los índices PMV y PPD. Estos modelos proporcionan un marco de referencia complementario al análisis adaptativo. El modelo PMV predice el nivel de confort térmico de las personas en una escala de -3 (muy frío) a +3 (muy caliente), basado en factores como a temperatura, la humedad, la velocidad del aire, la ropa, la tasa metabólica y la resistencia térmica de la vestimenta. El PPD calcula el porcentaje de personas que se sentirán incómodas en un ambiente, en función del PMV. Cuanto mayor es el valor de PMV, mayor es el porcentaje de insatisfacción. La Tabla 4 muestra la relación entre los índices PMV/PPD.

Tabla 3. Relación entre PMV y PPD

PMV	PPD (%)
-3	100
-2	95
-1	25
0	5
1	25
2	80
3	100

En oficinas, se asume que los ocupantes ajustan su vestimenta según la temporada, con 0.5 Clo en la cálida y 1.0 Clo en la fría, y mantienen una tasa metabólica de 1.2

Met, propia de actividades sedentarias.

## Resultados

Se realizaron simulaciones de una oficina típica basada en el modelo BESTest 600, utilizando modelos de confort térmico adaptativo para evaluar las condiciones térmicas específicas del clima de Misantla, Veracruz. A través de estas simulaciones, se determinaron las temperaturas de confort más adecuadas para este contexto climático, basadas en los modelos adaptativos. Además, se analizó la demanda energética anual para el enfriamiento, comparando los modelos de confort térmico adaptativos con un modelo de referencia basado en un Setpoint constante de 25°C durante todo el año.

Los resultados anuales indican que el edificio presenta un consumo energético de 12,461.2 kWh utilizando el modelo de referencia. En contraste, los modelos de confort adaptativo evidencian reducciones significativas, con valores de consumo anual de 9429.5 kWh, 11,239.5 kWh, 11,134.4 kWh, 10,712.6 kWh, 10,301.8 kWh y 9586.6 kWh para los modelos M.A 1, M.A 2, M.A 3, M.A 4, M.A 5 y M.A 6, respectivamente. Esto representa ahorros energéticos anuales del 24.30%, 9.80%, 10.60%, 14.00%, 17.20% y 23.10%, respectivamente, en comparación con el modelo de referencia.

De manera mensual, se observa que enero presenta un consumo de 875.1 kWh con el modelo de referencia, mientras que los modelos adaptativos lograron una reducción del consumo, alcanzando valores entre 667.3 kWh (M.A 6) y 766.9 kWh (M.A 4). En febrero, el consumo bajo el modelo de referencia fue de 800.6 kWh, mientras que los modelos adaptativos registraron valores de entre 613.6 kWh (M.A 1) y 716 kWh (M.A 3). Durante los meses más cálidos, como mayo y agosto, los modelos adaptativos también mostraron una reducción considerable de la demanda energética. Por ejemplo, en mayo, el consumo pasó de 1112 kWh en el modelo de referencia a un rango de entre 818.3 kWh (M.A 1) y 983.2 kWh (M.A 3). En agosto, el consumo energético del modelo de referencia fue de 1197 kWh, mientras que los modelos adaptativos lograron valores que variaron de 902.4 kWh (M.A 1) a 1070 kWh (M.A 3).

El mes con mayor demanda energética fue octubre, con un consumo de 1277 kWh utilizando el modelo de referencia. Los modelos adaptativos presentaron una notable reducción en este mes crítico, con valores de 1002 kWh, 1182 kWh, 1155 kWh, 1125 kWh, 1073 kWh y 1008 kWh para los modelos M.A 1, M.A 2, M.A 3, M.A 4, M.A 5 y M.A 6, respectivamente. Finalmente, en diciembre, el consumo energético bajo el modelo de referencia fue de 800 kWh, mientras que los modelos adaptativos oscilaron entre 616.6 kWh (M.A 1) y 743.8 kWh (M.A 4), lo que confirma una reducción sostenida incluso en los meses más fríos.

La Figura 3 presenta la comparación del consumo energético anual de los modelos de confort térmico adaptativo frente al modelo de referencia. En esta figura se evidencia que el modelo con mayor potencial de ahorro energético es el M.A 1, basado en la metodología propuesta por López-Pérez et al. (López-Pérez et al., 2019). Este modelo logra una reducción del 24.30% en comparación con el modelo de referencia, destacándose como la opción más eficiente entre los evaluados.

El análisis del modelo de confort térmico basado en los índices PMV y PPD se llevó a cabo considerando un día típico representativo de cada estación del año. La selección de un día típico representativo para cada estación del año tiene

como finalidad analizar con mayor precisión el desempeño del modelo adaptativo en escenarios térmicos específicos. Esto incluye condiciones extremas, como días muy cálidos y fríos, así como escenarios intermedios, como días cálidos y fríos. Este enfoque permite evaluar la capacidad del modelo adaptativo para responder a variaciones estacionales, proporcionando un marco detallado para interpretar el confort térmico en distintas condiciones climáticas. Para este análisis, los días seleccionados fueron el 12 de mayo para primavera, el 22 de agosto para verano, el 25 de octubre para otoño y el 15 de enero para invierno. Estos días se eligieron por su representatividad en función de los promedios climáticos estacionales y las características particulares de cada periodo.

Para la estación de primavera (12 de mayo), los valores de PPD presentan un nivel de confort térmico adecuado, con un rango que varía entre 24.26% (M.A 1) y 26.63% (M.A 3). Estos valores indican una alta aceptabilidad por parte de los ocupantes, dado que el PPD se encuentra dentro del intervalo de 20-30%, el cual es comúnmente considerado como indicativo de condiciones térmicas confortables. En cuanto a los valores de PMV, estos oscilan entre -0.53 (M.A 1) y -0.78 (M.A 3), lo que sugiere una sensación térmica ligeramente fresca, pero aún dentro de un rango considerado aceptable para la mayoría de los ocupantes. Dichos valores indican que las condiciones térmicas en esta estación se perciben como agradables, presentando una ligera frescura sin generar incomodidad significativa en los ocupantes.

Durante el verano (22 de agosto), los valores de PPD muestran una aceptabilidad térmica notablemente alta, con un rango que varía entre 12.9% (M.A 1) y 14.23% (M.A 3), lo que indica una mínima insatisfacción térmica. Este comportamiento sugiere que la mayoría de los ocupantes experimentaron condiciones agradables, con solo una ligera disconformidad térmica.

Los valores de PMV, que fluctúan entre -0.12 (M.A 1) y -0.37 (M.A 3), indican una sensación térmica ligeramente fresca, pero dentro de los rangos generalmente aceptables. Estos resultados son característicos de días cálidos de verano, donde las condiciones térmicas se mantienen dentro de un nivel confortable para los ocupantes.

Para el otoño (25 de octubre), los valores de PPD se encuentran en un rango de entre 24.37% (M.A 1) y 27.38% (M.A 3), lo que nuevamente refleja una aceptabilidad térmica favorable, comparable con los resultados obtenidos en primavera. Los valores de PMV, que varían entre -0.56 (M.A 1) y -0.77 (M.A 3), sugieren una ligera sensación de frescor, sin que esto llegue a generar incomodidad significativa en la mayoría de los ocupantes. Esto implica que las condiciones térmicas en otoño son en su mayoría agradables y se consideran confortables para los ocupantes en base a los valores de PPD y PMV.

Durante el invierno (15 de enero), los valores de PPD aumentan, alcanzando un rango entre 29.4% (M.A 1) y 32.57% (M.A 3), lo que indica un incremento en la insatisfacción térmica en comparación con las otras estaciones. Este patrón sugiere que una mayor proporción de los ocupantes percibe incomodidad térmica en este periodo. Los valores de PMV en invierno varían entre -0.67 (M.A 1) y -0.95 (M.A 3), lo que refleja una sensación térmica más fría, correspondiente a la percepción de frío por parte de los ocupantes, lo cual es característico de los días invernales. Aunque las condiciones podrían considerarse marginalmente incómodas, no se consideran extremas, pero sí se observa un aumento en la disconformidad térmica en relación con las estaciones más cálidas.

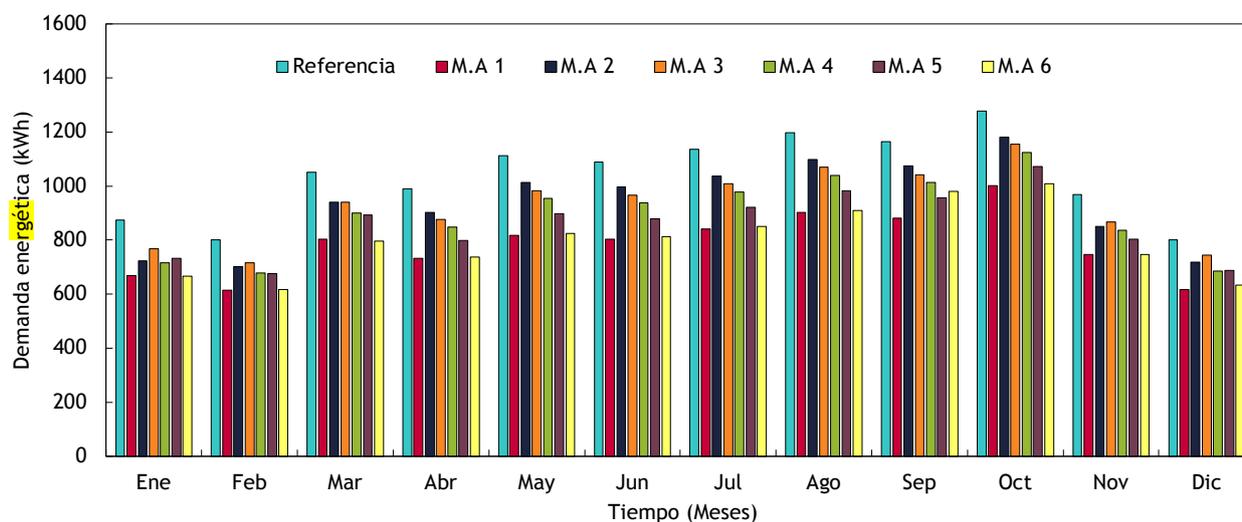


Figura 3. Comparativo de diferentes modelos adaptativos con el modelo de referencia en términos de demanda energética

## Discusión

Los resultados muestran que los modelos adaptativos son una opción efectiva para mejorar la eficiencia energética y el confort térmico en oficinas en climas tropicales. Estos modelos no solo reducen el consumo energético anual, sino que también proporcionan un confort térmico adecuado en la mayoría de las estaciones, especialmente en primavera y verano. El análisis de los resultados revela que el modelo M.A 1, basado en la metodología de López-Pérez et al. (López-Pérez et al., 2019), presenta el mayor potencial de ahorro energético, con una reducción del 24.30%. Este rendimiento se debe a su adaptación específica a climas tropicales cálidos, donde las temperaturas son consistentemente altas y las fluctuaciones térmicas son más marcadas. Esto le permite responder de manera eficiente a las características climáticas particulares de la región. En segundo lugar, el modelo CEN (CEN, 2007), con un ahorro del 23.10%, también muestra un buen desempeño. Su éxito puede atribuirse a su enfoque más amplio, que abarca diversos climas, permitiéndole ofrecer un rendimiento relativamente bueno en contextos tropicales, aunque con menor optimización que el modelo López-Pérez et al. (López-Pérez et al., 2019).

Por otro lado, los modelos de Nicol (Nicol, 2004) de Dear y Brager (de Dear & Brager, 1998), diseñados principalmente para climas templados, no lograron un desempeño satisfactorio en este análisis. La naturaleza de estos modelos, que no están pensados para adaptarse a las altas temperaturas y a la intensa radiación solar de los climas tropicales, limita su eficacia en este contexto. Del mismo modo, los modelos de ASHRAE (ASHRAE, 2013) y CIBSE (CIBSE, 2006), aunque estandarizados y ampliamente utilizados, no responden de manera óptima a las condiciones térmicas específicas de los climas tropicales. Este enfoque más generalista resultó en un menor potencial de ahorro energético en comparación con los modelos adaptativos como el de López-Pérez et al. (López-Pérez et al., 2019).

A pesar de las diferencias en la reducción del consumo energético, todos los modelos lograron mantener un confort térmico adecuado, proporcionando una sensación de "ligeramente fresco" durante la mayoría de las estaciones. Esto indica que, independientemente del modelo, todos cumplieron con las expectativas de confort térmico. Sin embargo, es crucial considerar el ahorro energético conjunto a largo plazo. En este sentido, el modelo López-Pérez et al. (López-Pérez et al., 2019) se destaca no solo por su capacidad para proporcionar confort, sino también por su mayor potencial de reducción de consumo energético, lo que lo posiciona como la opción más eficiente en términos de ahorro energético en climas tropicales.

## Conclusiones

Los modelos de confort térmico adaptativos evaluados en este estudio demostraron un alto potencial para mejorar las condiciones térmicas y reducir el consumo energético en oficinas típicas en el clima tropical de Misantla, Veracruz. El modelo M.A 1, basado en la

metodología de López-Pérez et al. (López-Pérez et al., 2019), fue el que mostró la mayor reducción energética anual, alcanzando un 24.30%. Este modelo destaca por su capacidad para adaptarse a las variaciones estacionales específicas del clima local, lo que le confiere una notable eficiencia en la gestión térmica de la oficina. Por otro lado, el modelo CEN (CEN, 2007), con una reducción del 23.10%, también mostró un desempeño destacado, aunque ligeramente inferior al de López-Pérez et al. (López-Pérez et al., 2019). Esta diferencia puede explicarse por el enfoque más amplio y generalista del modelo CEN (CEN, 2007), que considera diversos climas en su análisis, lo que le otorga una buena capacidad de adaptación, pero no optimiza tanto los parámetros específicos de Misantla. Los modelos de los estándares de ASHRAE (ASHRAE, 2013) y CIBSE (CIBSE, 2006), aunque ampliamente utilizados y aplicables en diversos climas, no fueron tan efectivos en este contexto debido a su naturaleza estandarizada, que no incorpora las particularidades de climas tropicales como el de Misantla. Los modelos de Nicol (Nicol, 2004) y de Dear y Brager (de Dear & Brager, 1998), por su parte, mostraron un rendimiento menor, indicando que su aplicación en este caso no fue tan eficiente como los modelos más adaptativos. Sin embargo, a pesar de las diferencias en la reducción energética, todos los modelos adaptativos lograron proporcionar un nivel de confort térmico adecuado, con sensaciones ligeramente frescas. Esto sugiere que, aunque algunos modelos ofrecen un buen desempeño en términos de confort térmico, su eficiencia energética no siempre es la óptima. En general, los modelos de López-Pérez et al. (López-Pérez et al., 2019) y CEN (CEN, 2007) destacaron como las opciones más eficientes, con un desempeño cercano y significativo en términos de ahorro energético y confort térmico.

## Contribución de los autores

**S.G.G.** Redacción, borrador original, revisión y edición, software, metodología, conceptualización.

**J.R.D.** Supervisión, revisión y edición, visualización, análisis formal.

**L.C.S.H** Supervisión, revisión y edición, visualización, análisis formal.

**L.G.C.H** Supervisión, revisión y edición, visualización, análisis formal.

**A.F.H** Supervisión, revisión y edición, visualización, análisis formal.

**W.G.B.G.** Redacción, borrador original, revisión y edición, software, metodología, conceptualización, Supervisión y revisión.

## Financiamiento

No se recibió ningún patrocinio para llevar a cabo este artículo.

## Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

## Presentaciones previas

Ninguna.

## Referencias

1. ASHRAE. (2013). Standard 55-2020: Thermal environmental conditions for human occupancy.
2. Báez-García, W., Simá, E., Chagolla-Aranda, M., Sandoval Herazo, L., & Carreto-Hernandez, L. (2024). Numerical-experimental study of the thermal behavior of a green facade in a warm climate in Mexico. *Energy and Buildings*, 114156.
3. Carreto-Hernandez, L., Moya, S., Báez-García, W., Herazo Sandoval, L., Francisco-Hernandez, A., Hernández-Jerónimo, J., & Téllez-Velázquez, E. (2024). Numerical-experimental investigation of a wind tower-room sustainable system: A parametric analysis of the mixed convection with humidification. *Journal of Building Engineering*, 109624. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109624>
4. Carreto-Hernandez, L., Moya, S., Varela-Boydo, C., & Francisco-Hernandez, A. (2022). Studies of ventilation and thermal comfort in different wind tower-room configurations considering humidification for a warm climate of Mexico. *Journal of Building Engineering*, 103675. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103675>
5. Carreto-Hernandez, L., Moya, S., Varela-Boydo, C., & Francisco-Hernandez, A. (2023). Numerical-experimental study of mixed convection in a wind tower-room system. *Building and Environment*, 110294. doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110294>
6. Carreto-Hernandez, L., Moya, S., Varela-Boydo, C., Juárez Sosa, I., Báez-García, W., Reyes, V., & Morales, J. (2024). Analysis of natural convection in a representative cavity of a room considering oscillatory boundary conditions: An experimental and numerical approach. *International Journal of Thermal Sciences*, 109357.
7. CEN. (2007). Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy, Performance of Buildings Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics, European Committee for Standardization. Brussels, Belgium.
8. Charles, K. (2012). Fanger's thermal comfort and draught models. National Research Council of Canada. NRC Institute for Research in Construction, 29.
9. CIBSE. (2006). Chartered institution of building Services, Environmental Design: CIBSE Guide A, CIBSE. London.
10. de Dear, R., & Brager, G. (1998). Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference.
11. Djongyang, N., Tchinda, R., & Njomo, D. (2010). Thermal comfort: A review paper. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2626-2640.
12. Fanger, P. (1970). Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering.
13. Humphreys, M. (1997). An Adaptive Approach to Thermal Comfort Criteria. En *Naturally Ventilated Buildings*.
14. Indraganti, M., Ooka, R., Rijal, H., & Brager, G. (2014). Adaptive model of thermal comfort for offices in hot and humid climates of India. *Building and Environment*, 39-53.
15. Jiao, Y., Yu, H., Yu, Y., Wang, Z., & Wei, Q. (2020). Adaptive thermal comfort models for homes for older people in Shanghai, China. *Energy and Buildings*.
16. Judkoff, R., & Neymark, J. (1995). International Energy Agency building energy simulation test (BESTEST) and diagnostic method (Technical Report No. 90674). National Renewable Energy Laboratory. doi:<https://doi.org/10.2172/90674>
17. López-Pérez, L., Flores-Prieto, J., & Ríos-Rojas, C. (2019). Adaptive thermal comfort model for educational buildings in a hot-humid. *Building and Environment*, 181-194.
18. Manu, S., Shukla, Y., Rawal, R., Thomas, L., & de Dear, R. (2016). Field studies of thermal comfort across multiple climate zones for the subcontinent: India Model for Adaptive Comfort (IMAC). *Building and Environment*, 55-70.
19. McCartney, K., & Nicol, J. (2002). Developing an adaptive control algorithm for Europe. *Energy and Buildings*, 623-635.
20. Nicol, F. (2004). Adaptive thermal comfort standards in the hot-humid tropics. *Energy and Buildings*, 628-637.
21. Nicol, F., Humphreys, M., & Roaf, S. (2012). *Adaptive Thermal Comfort: Principles and Practice*.
22. Nicol, J., & Humphreys, M. (1973). Thermal comfort as part of a self-regulating system.
23. Nicol, J., & Humphreys, M. (2002). Adaptive Thermal Comfort and Sustainable Thermal Standards for Buildings. *Energy and Buildings*, 563-572.
24. Oropeza-Perez, I., Petzold-Rodriguez, A., & Bonilla-Lopez, C. (2017). Adaptive thermal comfort in the main Mexican climate conditions with and without passive cooling. *Energy and Buildings*, 251-258.
25. Rijal, H., Humphreys, M., & Nicol, J. (2019). Adaptive model and the adaptive mechanisms for thermal comfort in Japanese dwellings. *Energy and Buildings*, 109371.
26. Taleghani, M., Tenpierik, M., Kurvers, S., & van den Dobbela, A. (2013). A review into thermal comfort in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 201-2015.
27. Upasani, N., Guerra-Santin, O., & Mohammadi, M. (2024). Developing building-specific, occupant-centric thermal comfort models: A methodological approach. *Journal of Building Engineering*, 110281.
28. Wang, T., Li, X., Lu, Y., Dong, L., Shi, F., & Lin, Z. (2025). An efficient thermal comfort prediction method for indoor airflow environment using a CFD-based deep learning model. *Building and Environment*, 267, 112246. doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112246>
29. Zakka, V., & Lee, M. (2024). A generalized thermal comfort model using thermographic images and compact convolutional transformers: Towards scalable and adaptive occupant comfort optimization. *Building and Environment*, 112118.
30. Zomorodian, Z., Tahsildoost, M., & Hafezi, M. (2016). Thermal comfort in educational buildings: A review article. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 895-9006. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.033>