

Evaluación numérica del desempeño de una edificación con estrategias bioclimáticas en ciudad de Panamá

Numerical evaluation of the performance of a building with bioclimatic strategies in Panama city

Angienely Humphries¹, Dafni Mora², Miguel Chen Austin³

¹ Universidad Tecnológica de Panamá, Facultad de Ingeniería Mecánica, Panamá

² Sistema Nacional de Investigación (SNI), Clayton Ciudad de Panamá, Panamá

^amiguel.chen@utp.ac.pa

¹ <https://orcid.org/0000-0002-0299-8519>, ² <https://orcid.org/0000-0002-7320-5061>, ³ <https://orcid.org/0000-0001-5766-6020>

Fecha de recepción: 11 de diciembre de 2024

Fecha de aceptación: 15 de enero de 2025.

DOI <https://doi.org/10.48204/2710-7426.6853>



RESUMEN: Las edificaciones sostenibles tienen como objetivo minimizar el impacto ambiental al utilizar eficientemente los recursos, la energía y los materiales, al mismo tiempo que fomentan el bienestar de sus habitantes. Siendo así que el presente caso de estudio corresponde a una instalación bioclimática diseñada para las comunidades vulnerables en Panamá, orientada al sur. En este estudio, usando el software Designbuilder, se realizaron análisis de rendimiento térmico, considerando principalmente el uso de ventilación natural a través de los indicadores PCVN y HSVN; análisis de rendimiento energético, en el que se evaluó el uso del aire acondicionado como complemento de la ventilación natural para las horas de incomfort; evaluación del potencial de generación de energía renovable, en el que se analizó el uso de un sistema fotovoltaico a través de dimensionamiento estático y dinámico; y la evaluación de la huella de carbono en la edificación. Como resultado se obtuvo que el PCVN fue solo del 20%, afectado por la alta humedad, mientras que el HSVN alcanzó el 70%. Además, se analizó el uso de aire acondicionado como apoyo a la ventilación natural y la implementación de un sistema fotovoltaico que cubre gran parte de la demanda energética del edificio. Los resultados indican que este enfoque no solo mejora el confort interior, sino que también reduce las emisiones de CO₂, promoviendo un diseño sostenible para sectores vulnerables.

PALABRAS CLAVES: Confort, eficiencia, estrategias bioclimáticas, HSVN, PCVN, rendimiento energético, rendimiento térmico, sistema fotovoltaico, ventilación pasiva.

ABSTRACT: Sustainable buildings aim to minimize environmental impact by efficiently using resources, energy, and materials, while promoting the well-being of their inhabitants. This case study focuses on a bioclimatic building designed for vulnerable communities in Panama, oriented to the south. In this study, using the Designbuilder software, thermal performance analyses were conducted, mainly considering the use of natural ventilation through the PCVN and HSVN indicators; energy performance analysis, evaluating the use of air conditioning as a complement to natural ventilation during uncomfortable hours; evaluation of renewable energy generation potential, analyzing the use of a photovoltaic system through static and dynamic sizing; and the carbon footprint assessment of the building. The results showed that the PCVN was only 20%, affected by high humidity, while the HSVN reached 70%. Additionally, air conditioning use was analyzed as support for natural ventilation, and the implementation of a photovoltaic system that covers a large part of the building's energy demand. The results indicate that this approach not only improves interior comfort but also reduces CO₂ emissions, promoting sustainable design for vulnerable sectors.

KEYWORDS: Comfort, efficiency, bioclimatic strategies, HSVN, PCVN, energy performance, thermal performance, photovoltaic system, passive ventilation.

1. INTRODUCCIÓN

En la búsqueda constante del cambio, el ser humano ha logrado grandes avances en todas las aristas que componen la estructura de una sociedad. Sin embargo, en el afán de progresar, se han dejado rezagados diversos grupos por nivel socioeconómico, género, condición étnico-racial, edad y territorio, además de otras condiciones, como la situación de discapacidad o el estatus migratorio. También con el desarrollo de la población y como consecuencia de la desigualdad existente, el medio ambiente se ha visto afectado, ya que la tasa de contaminación, en todas sus formas, ha ido en aumento en los últimos años.

Es por ello que la Organización de las Naciones Unidas adoptó los objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) como medio para “poner fin a la pobreza y proteger el planeta”, a fin de garantizar para 2030 un futuro próspero para la humanidad [1]. De los 17 objetivos existentes, el presente estudio se relaciona con uno de ellos “ciudades y comunidades sostenibles” mediante la valoración de una edificación sostenible.

Los autores en [2] señalan que el ambiente térmico de una edificación tiene incidencia sobre la salud, el bienestar y la productividad de los ocupantes; por lo tanto, es un factor importante para considerar en la construcción o adaptación de recintos en general. Es por ello por lo que se realizan las evaluaciones termoenergéticas para identificar las oportunidades de ahorro energético a través de la envolvente, ya sea en la selección de materiales, orientación de la edificación y otros factores previos a la construcción o elementos reemplazables que permitan mejorar las condiciones de un recinto existente. Es decir, aplicando medidas pasivas y activas de ahorro energético según los resultados de las evaluaciones a realizar.

1.1. Estado del arte

Para mejorar el desempeño térmico-energético de una edificación se aplican diversas estrategias bioclimáticas, como los modelos Bruce Novell ampliado (BNA), que se focaliza en las necesidades de protección solar; la clasificación de arquitectura bioclimática, que sirve de soporte al modelo Givoni-Watson-Szockolay; las estrategias Bioclimáticas Horarias (GWS-EBH), en el cual se juntan las estrategias bioclimáticas de las cartas psicrométricas de los tres autores involucrados; el método Mahony-Evans (MET-ME), que considera la inercia térmica, las edificaciones cerradas, las

pequeñas ventanas y la protección solar sin aportar valores cuantitativos [3].

Con base en lo anterior, los autores en [4][5] determinaron las condiciones óptimas para propiciar la ventilación cruzada. De igual manera se realizaron las evaluaciones energéticas y de los materiales que componen la edificación para obtener el estado base, cargas térmicas y de refrigeración de esta. Las opciones de mejoras propuestas alcanzaron ahorros en el consumo por climatización en el rango de 33% a 56%, logrando el confort térmico en una región de clima semiárido en San Juan, Argentina. En este país también se han realizado diversos estudios en el ámbito termoenergético a través de entidades no gubernamentales. Sin embargo, hay que destacar que el gobierno argentino, específicamente, desarrolló el programa “Etiquetado de Viviendas”, que tiene como objetivo “instituir la Etiqueta de Eficiencia Energética como instrumento que brinde información al ciudadano acerca de las prestaciones energéticas de una vivienda y constituya una herramienta de decisión adicional en operaciones inmobiliarias, evaluación de proyectos o realizar intervenciones en viviendas existentes”. Este programa cuenta con un software para la simulación de edificaciones, a fin de verificar el cumplimiento de las normas propuestas [6]. Teniendo esto en cuenta, los autores en [7] desarrollaron un estudio en una zona residencial en Argentina con clima templado cálido húmedo, aplicando el Etiquetado de Viviendas. Para ello, se recolectaron datos de campo respecto al clima, geografía y características tecno-constructivas y se realizó una evaluación energética para obtener el caso de referencia. De lo resultante, se practican mejoras a los componentes constructivos de la envolvente previo al levantamiento del recinto. Como resultado, se obtuvo que la unidad vecinal del Papa Francisco, que fue el caso de estudio, cumple con los mejores criterios de sostenibilidad en comparación con las unidades vecinales tradicionales. Pero si la evaluación de beneficio se hubiera iniciado en sus primeras etapas, se tendría una solución constructiva 63% más eficiente.

En lo que a análisis termoenergético respecta, en Ciudad de Veracruz, México, se realizó una simulación termoenergética de tres recintos con cargas de calor generadas por equipos eléctricos [8]. Al igual que en estudios anteriores, el análisis se realizó utilizando simulaciones en el software EnergyPlus. Se realizó, en primera instancia, un monitoreo energético en las edificaciones y se comprobó que el entorno tiene un efecto proporcional en el uso de la climatización activa. También, se desarrollaron simulaciones energéticas, agregando tres

tecnologías de climatización pasiva (impermeabilización de techos, sombreado y techo verde), donde el mejor resultado se obtuvo del techo verde con un 10% de ahorro de energía.

El uso de aislantes térmicos en las edificaciones en general reduce de manera significativa la carga térmica mejorando así el confort en el recinto. Si adicional a esto se toma en consideración la orientación y el tamaño de las ventanas, el confort puede ser mucho mayor.

Sobhy et al. [9], en su investigación, valida lo anterior expuesto en cuanto a aislante térmico se refiere, ya que se realizó una evaluación en una edificación en Marruecos en un clima cálido semiárido. Se concluyó que los aislantes térmicos son elementos primordiales en la reducción de las cargas de calefacción en el caso del invierno, pero se debe tener especial cuidado en su selección, pues lo que funciona para el invierno puede provocar sobrecalentamientos en verano. Para climas como los de Marruecos, se debe diseñar con base en la carga de refrigeración, ya que esta se encuentra presente durante más de seis meses en el año. Los resultados arrojaron que las cargas de calefacción y refrigeración se redujeron en un 10% y un 30%, respectivamente, al utilizar el poliestireno extruido como aislante térmico en la cubierta en comparación con el caso base que no posee aislamiento en la envolvente. Adicionalmente, se incorporó una cámara de aire de 5 cm en las paredes, lo cual permite que el ahorro total de energía en las cargas de calefacción y refrigeración sea de 13 y 5%, respectivamente en comparación con el caso base. Y, si se incorpora una barrera radiante en conjunto con la cámara de aire, los ahorros ascienden a 19% para calefacción y 31% para refrigeración.

Muchas otras estrategias son aplicadas para mejorar el confort y reducir el consumo energético en una edificación, como las presentadas en el estudio de Shandilya [10], en el cual se evaluaron diversas estrategias de renovación energética para las zonas climáticas de la India. Para las zonas con climas compuestos resultan más relevante que el foco sea la demanda de refrigeración por lo que, según los análisis realizados, las demandas de calefacción y refrigeración se redujeron en un 82% al aplicar aislantes térmicos en las paredes y el techo y ventanas de triple acristalamiento con sistema de control de sombra externo, solo activo durante el verano. Como consecuencia, el porcentaje de incomfort disminuye de un 40% a un 28%. Por otro lado, si se añade aislamiento al suelo, se puede disminuir aún más la demanda de calefacción, pero esto puede aumentar la demanda de refrigeración durante el verano. Para el clima caliente y seco, las construcciones deben realizarse totalmente herméticas y aisladas térmicamente, lo que resulta en una baja infiltración, techos aislados y control de sombras. Esto puede reducir la demanda energética en un 50% en estas zonas y si se incluye el aislamiento térmico de las paredes, el ahorro energético asciende a un 70%, por lo tanto, el incomfort se reduce de un 40% a menos del 25%. Según las simulaciones realizadas, en zonas de clima cálido y húmedo las

estrategias deben enfocarse en reducir la demanda de refrigeración, lo cual se puede obtener mediante el uso de aislantes térmicos en paredes y ventanas con control de sombra; alcanzando así un ahorro aproximado del 70% de la demanda energética total y reduciendo el incomfort de un 30 a 5%.

Resulta imprescindible considerar la orientación de la edificación, lo que también conlleva la evaluación del sombreado y flujo de la ventilación natural, según lo expusieron [11] quienes presentaron las mejores estrategias de ventilación natural y sombreado para mitigar los problemas de sobrecalentamiento en una torre residencial en Bilbao durante el clima cálido mediante simulaciones dinámicas. Se analizó el efecto directo de diversos factores sobre la temperatura interna, lo que demuestra que puede producirse un sobrecalentamiento en la temporada de calor, ya que al aislar las edificaciones térmicamente durante el invierno, en la época de verano se produce el sobrecalentamiento, por ende, la investigación concluye que los apartamentos con orientación en esquina y cruzada funcionan mejor que los de orientación simple para la ventilación natural, produciendo más renovaciones por hora. Sin embargo, se deben regular las diferentes estrategias de ventilación natural para evitar altas tasas de flujo de aire y combinar diferentes estrategias pasivas, como utilizar sistemas de sombreado en el exterior y que sean móviles, ya que de este tipo brindan mejores resultados en cuanto al confort térmico en las residencias .

Dicho esto, es evidente que todos los estudios expuestos en esta sección convergen en la aplicación de medidas pasivas como primer paso en la reducción del consumo energético, las cuales se deben considerar al momento de la selección de los materiales para construcción del recinto. El entorno juega un papel muy importante en el confort térmico del usuario mediante el uso de sistemas de climatización pasiva. Si se tienen en cuenta estos aspectos al momento de construir cualquier tipo de edificación, se pueden obtener recintos accesibles, de alta calidad y respetuosos con el entorno; dicho de otra manera, ecosostenibles. Esto se sustenta en el estudio de [12] en el que comparan dos edificios de oficinas, uno sostenible y el otro tradicional, presentando el edificio sostenible un 35% menos en costos respecto al edificio tradicional.

1.2. Objetivo del estudio

En este sentido, el objetivo de este estudio es evaluar el rendimiento térmico y energético de una edificación bioclimática a través de simulación dinámica, con miras a ser autosuficiente (utilizando energías renovables). Este objetivo se pretende alcanzar, primeramente, evaluando el rendimiento térmico de la edificación en modo pasivo a través de indicadores de confort térmico, y niveles de CO₂. Segundo, evaluando el rendimiento energético de la edificación en modo

activo para conseguir el confort interior. Por último, se planea determinar el porcentaje de la demanda energética que puede ser cubierta por energías renovables a través de un dimensionamiento estático y dinámico.

2. METODOS Y MATERIALES

2.1. Descripción del caso de estudio

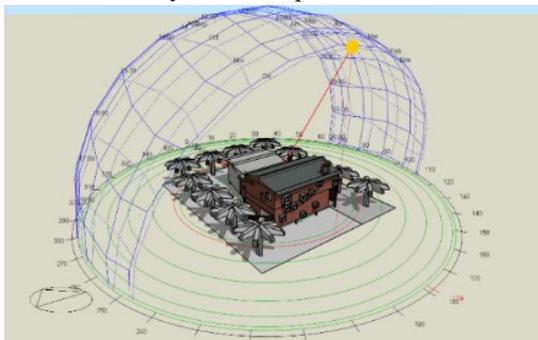
El caso de estudio corresponde a una instalación bioclimática diseñada para comunidades vulnerables en la provincia de Panamá, distrito de Panamá, por su situación precaria y vulnerabilidad social, que permita reducir la necesidad del uso de energía eléctrica de la red.

Dicha instalación está orientada al sur y está constituida por dos edificaciones: la primera, que será el foco de este estudio (Figura 1), cuenta con dos plantas, la cual se ha nombrado como “Edificio 1”.

En total, la instalación posee aproximadamente 286 m² de los cuales 72 m² corresponden al Edificio 1 y 47.7 m² al Edificio 2 y el resto pertenece al patio interno y áreas verdes que rodean la instalación.

Para estudiar el comportamiento térmico y energético, se simuló el Edificio 1 en el software DesignBuilder versión 6.1.8.021, teniendo en cuenta las condiciones climáticas históricas típicas de Panamá (no un año en particular), detalles constructivos, perfiles de ocupación, sistemas de iluminación, entre otras.

Para el diseño de la instalación evaluada en este estudio, se aplicaron diversos elementos y técnicas constructivas que contribuyen a mejorar el desempeño térmico de la edificación: chimenea solar, antepecho ventilado, rejillas de ventilación, bandejas reflectoras o estantes de luz, pintura blanca en el exterior, techos fríos y ventanas pivotantes.



(a)



(b)

Figura 1. Edificación del caso de estudio (edificio 1): (a) modelo 3D de la instalación completa y (b) vista frontal.

2.2. Evaluación del rendimiento térmico

Se evaluaron cuatro las siguientes condiciones: Caso 1: caso base en el cual las ventanas permanecen cerradas todo el día y no cuenta con ninguna estrategia bioclimática. Caso 2: con medidas bioclimáticas aplicadas y las ventanas están abiertas durante 24 horas. Caso 3: con medidas bioclimáticas aplicadas y las ventanas están abiertas en un horario de 1:00 p.m. a 9:00 p.m. de lunes a viernes y los fines de semana de 8:00 a.m. a 10:00 p.m. Caso 4: con medidas bioclimáticas aplicadas y las ventanas están abiertas en horario nocturno, de 7:00 p.m. a 7:00 a.m.

2.3. Evaluación del rendimiento energético

Para los casos resultantes con mejor rendimiento térmico, se activó el uso del aire acondicionado para las horas en las que no se utiliza la ventilación natural, específicamente para el caso 4, donde se configuró el uso del aire acondicionado de 7:01 a.m. – 6:59 p.m. Incluir la refrigeración, a pesar de representar un aumento energético, contribuye a alcanzar niveles de confort térmico interior.

Para evaluar los niveles de confort térmico, se propone utilizar los indicadores de Voto Meddío Previsto (VMP) por la existencia de sistemas mecánicos y el porcentaje de personas insatisfechas (PPD). Según exponen los autores en [13], entre los -0.5 y +0.5 son los niveles adecuados de VMP para edificios nuevos; y para el PPD ningún espacio ocupado debe superar 20%. Sin embargo, los autores en [14] presentan que el VMP se evalúa en una escala que va de -3 a 3, en la cual -3 es muy frío; -2 es frío; -1, moderadamente frío; 0, neutral; 1, moderadamente caliente; 2, caliente y 3, muy caliente.

2.4. Evaluación del potencial de generación renovable

Se proponen dos enfoques para la evaluación del potencial de generación renovable, por un lado, el dimensionamiento estático que se basa en un escenario con las características del sistema fotovoltaico, la radiación según el promedio diario más débil y la demanda eléctrica de la edificación. Por otro lado, el dimensionamiento dinámico del sistema, por el contrario, considera la inclinación, orientación y la dinámica de disponibilidad solar del sitio donde se encuentra la edificación.

2.4.1. Dimensionamiento estático de un sistema fotovoltaico

Se definió la cantidad de módulos según el área de techo disponible para el Edificio 1, como se muestra en la Tabla 1 para un módulo de 2.22 m² y una potencia nominal de 450 W. Con los datos expuestos en la Tabla 1, en conjunto con la Tabla 2, se obtuvo la potencia teórica generada por los paneles para el Edificio 1.

Para calcular la potencia nominal del sistema fotovoltaico, la cantidad del módulo fue multiplicada por la potencia fotovoltaica, y la energía generada se calculó utilizando las siguientes ecuaciones:

Para calcular la potencia nominal del sistema fotovoltaico, la cantidad del módulo fue multiplicada por la potencia fotovoltaica, y la energía generada se calculó utilizando las ecuaciones (1) y (2):

$$P_{ins} = NP_n \quad (1)$$

$$W_{el} = \frac{\phi_{daily}}{\phi_{STC}} k_{eff} P_{ins} \quad (2)$$

Donde P_{ins} es la potencia instalada en kW, N es el número de módulos, y P_n es la potencia nominal del módulo en kW. W_{el} es la electricidad generada en kWh, ϕ_{daily} es la irradiación solar diaria en el módulo en kWh, ϕ_{STC} es la irradiación solar para condiciones de ensayo estándar (1 kW m ϕ_{STC}^{-2}), y k_{eff} es el factor de corrección del rendimiento del sistema 0,85 recomendado [15,16]

Tabla 1. Dimensionamiento estático del sistema fotovoltaico.

Áreas en m ²	Número de módulos	Potencia instalada en W	
Techo A	23.17	10	4696.82
Techo B	37.91	17	7684.97
Área total del techo	61.08	P. instalada total kW	12.38

2.4.2. Dimensionamiento dinámico de un sistema fotovoltaico

Una desventaja del dimensionamiento estático es que, en sus cálculos, distribuye el área del módulo fotovoltaico en el área disponible de techo. Sin embargo, no considera la disposición del módulo en el techo, por lo que, en el dimensionamiento dinámico, la cantidad de módulos utilizados es menor y la generación eléctrica se acerca más a la realidad.

Si bien en el dimensionamiento estático se tomó en cuenta el espacio de la chimenea solar, no se había considerado la proyección de sombras de este elemento, lo que también contribuyó en la disminución de módulos utilizados.

Lo anterior se lleva a cabo directamente en el software Designbuilder con su módulo de energía renovable, que permite la incorporación de las características de los módulos fotovoltaicos, considerando lo antes expuesto.

2.4.3. Evaluación de la huella de carbono equivalente operacional de la edificación

Toda actividad humana lleva consigo la generación de gases de efecto invernadero (GEI), principalmente de dióxido de carbono (CO₂).

Un indicador ambiental que permite identificar el rastro de GEI de una actividad es la huella de carbono equivalente, ya que estima las emisiones de los GEI, ya sean directas o indirectas.

Para obtener la generación de dióxido de carbono equivalente operacional de la edificación. El software Designbuilder calcula emisiones de CO₂ multiplicando el consumo de combustible simulado por el factor de emisión de para ese combustible, siendo este factor variable según la región para la cual se realice la simulación [17].

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Evaluación del rendimiento térmico

Se evaluaron los casos descritos anteriormente para obtener el potencial climático de ventilación natural (PCVN), presentado en la Tabla 2, junto con las horas favorables de ventilación mensual calculadas a partir de los datos resultantes de la simulación en Designbuilder.

Según lo expuesto en la Tabla 2, el caso 4 (ventilación natural nocturna) presenta resultados más favorables en comparación al resto. Sin embargo, el segundo mejor resulta ser el caso base, el cual no tiene ninguna estrategia bioclimática aplicada y las ventanas cerradas durante todo el día todos los días. Esto se atribuye a que el PCVN considera en conjunto que la Temperatura exterior debe ser menor a la temperatura interior inferior y mayor a la temperatura interior superior, siendo estas definidas por la temperatura de confort; y a su vez, la humedad relativa según la normativa, debe ser considerada entre 30 y 70% [18]

Según lo expuesto en la Tabla 2, el caso 4 (ventilación natural nocturna) presenta resultados más favorables en comparación al resto. Sin embargo, el segundo mejor resulta ser el caso base, el cual no tiene ninguna estrategia bioclimática aplicada y las ventanas cerradas durante todo el día todos los días. Esto se atribuye a que el PCVN considera en conjunto que la Temperatura exterior debe ser menor a la temperatura interior inferior y mayor a la temperatura interior superior, siendo estas definidas por la temperatura de confort; y a su vez, la humedad relativa que según la ASHRAE 55, debe ser considerada entre 30 y 70%.

Si se evaluaran ambos criterios individualmente, se puede observar que la temperatura del aire en el caso 1 supera al límite superior de 28.5 °C según el rango de confort en Panamá (23.5 a 28.5 °C) [19].

Para el caso 2, la temperatura del aire se encuentra dentro del rango de confort al menos cinco meses del año, presentando mejor rendimiento que el caso 1 en este aspecto.

En el caso 3, la temperatura del aire se encuentra dentro del rango de confort en la mayor parte del año.

Respecto al caso 4, la temperatura del aire a lo largo del año se encuentra completamente dentro del rango de confort establecido.

Tabla 2. Potencial climático de ventilación natural.

	Caso 1		Caso 2		Caso 3		Caso 4	
	Horas favorables de VN	PCVN						
Enc	206	27.69%	170	22.85%	178	23.92%	188	25.27%
Feb	216	32.14%	183	27.23%	195	29.02%	194	28.87%
Mar	253	35.14%	236	32.78%	242	33.61%	209	29.03%
Abr	178	24.72%	154	21.39%	163	22.64%	202	28.06%
May	56	7.53%	47	6.32%	43	5.78%	142	19.09%
Jun	32	4.44%	27	3.75%	21	2.92%	100	13.89%
Jul	57	7.66%	48	6.45%	47	6.32%	136	18.28%
Ago	22	2.96%	35	4.70%	29	3.90%	135	18.15%
Sep	18	2.50%	21	2.92%	20	2.78%	100	13.89%
Oct	37	4.97%	33	4.44%	37	4.97%	104	13.98%
Nov	47	6.53%	38	5.28%	37	5.14%	97	13.47%
Dic	96	12.90%	92	12.37%	85	11.42%	178	23.92%
Prom anual	101.50	14.10%	90.33	12.54%	91.42	12.70%	148.75	20.49%

Por otro lado, en ningún caso se logra alcanzar la temperatura de confort calculada para la obtención del PCVN, ya que temperaturas tan bajas en este clima y sitio solo son alcanzables en horas de 4:00 am a 6:00 am.

Según lo expuesto, el PCVN en este caso de estudio se ve más influenciado por la humedad relativa que por la temperatura del aire. Comparando la humedad relativa en cada caso, los cuales se encuentran por debajo de la humedad exterior, todos sobrepasan el límite superior establecido para confort (70%) en más de la mitad del año. También se observa que, según la apertura para ventilación de cada caso, la

humedad relativa aumenta o disminuye, justificando los resultados obtenidos en la Tabla 2. No obstante, el PCVN no es el único indicador que permite cuantificar la ventilación natural.

3.1.1. Horas satisfechas de ventilación natural (HSVN)

En la Tabla 3, se exponen los resultados obtenidos del cálculo de las horas satisfechas de ventilación natural utilizando la plantilla de confort adaptativo de la AHSRAE 55 para un 80% de aceptabilidad.

A diferencia del PCVN, el HSVN considera la tasa de renovación de aire por hora (ACH), temperatura del aire, temperatura radiante, temperatura operativa y la temperatura exterior de bulbo seco.

De los casos expuestos en la Tabla 3, el caso 4 presenta el mayor número de horas dentro del 80% de aceptabilidad. El resto presenta índices consecuentes según su horario de apertura de ventanas para ventilación natural por efecto del ACH.

Tabla 3. Horas satisfechas de ventilación natural

	Horas medidas NO válidas:	Horas medidas válidas:	Horas medidas TOTALES:	Horas dentro de 80% de aceptabilidad:		Horas fuera de 80% de aceptabilidad:	
Caso 1	6	8,754	8,760	3,867	44.17%	4,887	55.83%
Caso 2	0	8,760		5,093	58.14%	3,667	41.86%
Caso 3	0	8,760		5,712	65.21%	3,048	34.79%
Caso 4	1	8,759		6,115	69.81%	2,644	30.19%

3.1.2. ACH y velocidad del aire interior

La tasa de renovación de aire expresa el caudal de aire enviado, en este caso del exterior, por cada entrada de aire al interior del recinto por unidad de hora en relación con el volumen total del recinto evaluado. Por lo que es un parámetro importante en la determinación de los resultados expuestos en la Tabla 3.

En la Figura 2, se observa el ACH mensual según cada caso y cómo supera el número recomendado de ACH por la norma DIN 1946 (entre 3 y 25 para residencias) [20].

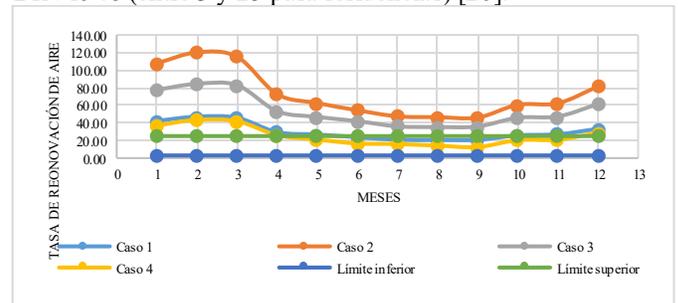


Figura 2. Tasa de renovación de aire para cada caso del Edificio 1.

En la Figura 2, se observa más en detalle que los casos que presentan un mayor número de horas con las ventanas abiertas, el ACH alcanza valores de hasta 120 renovaciones por hora en los meses de verano. Sin embargo, no es el principal factor

determinante en el confort de una vivienda, como se evidenció en los resultados del PCVN (Tabla 2) y HSVN (Tabla 3).

Otro punto considerado para definir las condiciones de confort por ventilación natural en una edificación es la velocidad del aire interior, la cual puede brindar un efecto de enfriamiento adicional, como se muestra en la Tabla 4. Sin embargo, esta no considera el porcentaje de humedad relativa.

Tabla 4. Disminución de la temperatura del aire en función de la velocidad de movimiento del aire [21].

Velocidad (m/s)	Temperatura del aire (°C)			
	15	20	25	30
Menor a 0.1	0	0	0	0
0.25	2.0	1.3	0.8	0.5
0.5	4	2.7	1.7	1.0
1	6.7	4.5	2.8	1.7
1.5	8.5	5.7	3.5	2
2	10	60.7	4	2.3

Fumadó [22] señala que una velocidad inferior a 0.1 m/s resulta una sensación de falta de aire, que provoca inconformidad en el ocupante. En otros estudios, como el de [23] se muestra que para un rango de temperatura de 26 a 32°C y humedad relativa de 40 a 90% las velocidades del aire óptimas según los sujetos estudiados van desde los 0.28 a 0.39 m/s, alcanzando estas temperaturas utilizando ventiladores.

Sin embargo, hay que tener presente que la sensación de confort depende más del ocupante que de la fuente con que se genere la ventilación. En la Tabla 5, se expone el número de horas al año para cada caso en el que se alcanzan velocidades óptimas de aire interior.

El caso 2 presenta el mayor número de horas al año, pues se aprovecha la ventilación natural todo el día todos los días a diferencia de los otros casos. No obstante, tomando en consideración todo lo evaluado anteriormente el caso más favorable es el de ventilación natural nocturna (caso 4), ya que presenta el mayor número de horas favorables al año para el uso de ventilación natural (66% aproximadamente), de igual manera es el caso con mayor PCVN.

Tabla 5. Horas anuales de velocidad de aire interior óptima.

	Horas anuales iguales o mayores a 0.28 m/s	Horas anuales mayor a 0.1m/s
Caso 1	0	2538
Caso 2	1710	7222
Caso 3	732	5690
Caso 4	26	2506

3.2. Evaluación del rendimiento energético

3.2.1. Iluminación natural

En el caso 4 del Edificio 1, el consumo anual de iluminación es de 1391.89 kWh, lo que podría disminuir si se utilizase el control lineal de iluminación; sin embargo, en este caso se priorizó el confort térmico de la edificación, ya que al utilizar la ventilación natural nocturna las ventanas permanecen

cerradas durante el día y para evitar el aumento de la temperatura interior, se le colocaron persianas con el mismo horario de apertura de las ventanas.

Si se mantienen las luces encendidas durante todo el día para el caso 2 mencionado, el consumo en este rubro es de 174.68 kWh. Utilizando el control lineal, el consumo en iluminación disminuye a 90.96 kWh, mejorando el rendimiento energético en lo que respecta a iluminación.

3.2.2. Uso del acondicionamiento de aire

En la Figura 4, se observa que a pesar de que la ventilación natural no cumple con el rango recomendado para VMP, este si se mantiene durante la mayoría del año en el área moderadamente caliente; de igual manera, el aire acondicionado no permite llevar al VMP al rango recomendado de 0.5, pero sí logra mantenerse en un ambiente entre neutro, para los meses de lluvia, y moderadamente caliente, para el resto del año. Esto puede deberse a que la temperatura mínima establecida para el aire acondicionado fue de 20 °C.

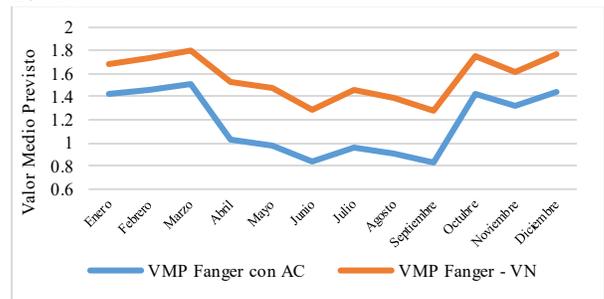


Figura 4. VMP- Edificio 1 - Caso 4.

En la Figura 5, se observa que mensualmente el PPD supera el porcentaje máximo recomendado de 20%, incluso en los meses de lluvia. Este porcentaje solo es alcanzado 2176 horas al año, lo que representa aproximadamente un 25% del año.

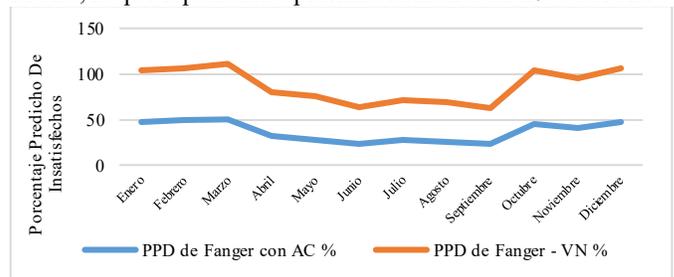


Figura 5. PPD - Edificio 1 - Caso 4.

3.3. Evaluación del potencial de generación renovable

3.3.1. Dimensionamiento estático de un sistema fotovoltaico

En la tabla 6 se presenta el detalle del dimensionamiento estático de un sistema fotovoltaico para la obtención de la potencia generada por los módulos.

Tabla 6. Electricidad y Potencia generada.

Mes	ϕ daily			
-----	--------------	--	--	--

	(kWh m ⁻² d ⁻¹)	Wel (KWh/d)	Potencia generada por los módulos (KWh)	Consumo total mensual (KWh)
Enero	5.04548	53.1	1646.14	818.39
Febrero	5.19571	54.68	1531.11	726.39
Marzo	5.57774	58.7	1819.8	859.83
Abril	4.81767	50.7	1521.11	828.74
Mayo	4.33677	45.64	1414.92	952.69
Junio	4.61633	48.58	1457.54	854.61
Julio	4.4971	47.33	1467.22	896.5
Agosto	4.51032	47.47	1471.54	874.22
Septiembre	4.45	46.83	1405.02	807.45
Octubre	4.45935	46.93	1454.91	868.82
Noviembre	4.05567	42.68	1280.52	805.64
Diciembre	4.66323	49.08	1521.42	862.11
Anual			17991.3	10155.4

En la Figura 6, se observa que para el Edificio 1 se utilizaron 20 módulos en total (5 en el techo A y 15 en el techo B). Esto dio como resultado lo expuesto en la Figura 7, en la que muestra el consumo eléctrico total de iluminación y refrigeración, y en conjunto con la generación de los módulos según el dimensionamiento estático y el dinámico.

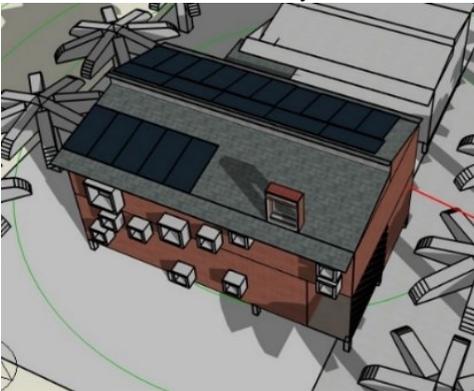


Figura 6. Sistema fotovoltaico dimensionado con el método dinámico.

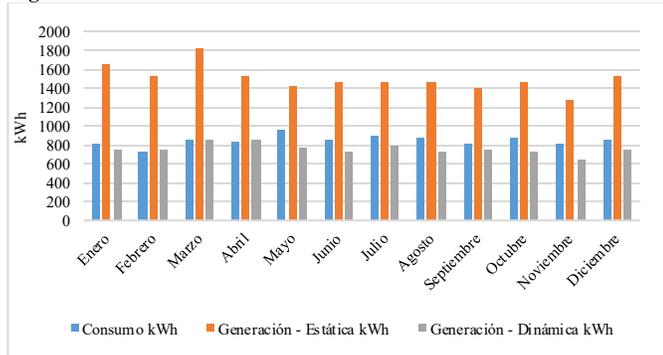


Figura 7. Generación eléctrica por los paneles fotovoltaicos.

Teniendo en cuenta lo expuesto en la Figura 7, el balance energético resultante es de 1021.36 kWh, donde el consumo anual es de 10155.39 kWh, considerando un consumo máximo de refrigeración, y la generación dinámica anual es de 9134.05 kWh. Esto indica que, a pesar de cubrir gran parte de la

demanda energética, el Edificio 1 no alcanza un balance neto cero. Sin embargo, esto puede lograrse si se ajustan los horarios de consumo de aire acondicionado a menos de 12 horas diarias.

3.3.2. Evaluación de la huella de carbono equivalente operacional de la edificación

En la Figura 8, se muestra el comportamiento del Edificio 1 respecto a la generación de dióxido de carbono.

Se evidencia que para los meses en que la generación fotovoltaica iguala o supera el consumo, la gráfica toma valores negativos, lo que indica cómo el sistema fotovoltaico compensa las emisiones de dióxido de carbono en esos meses.



Figura 8. Emisiones de CO₂ equivalentes como balance entre lo consumido menos lo generado de energía eléctrica.

Anualmente las emisiones de CO₂ para el Edificio 1 es de 22.2 kg, por lo que, la edificación se clasificaría como clase A por tener un consumo inferior a 10 kg CO₂ por m² al año (0.31kg de CO₂ por m² al año), teniendo en cuenta que este estudio no considera el comportamiento de los ocupantes ni el consumo energético de los artefactos que no corresponden a iluminación ni a confort térmico.

4. DISCUSIÓN

En primera instancia, las estrategias bioclimáticas ayudan a reducir el consumo energético, el confort mediante el aprovechamiento de los recursos naturales que provee el entorno de la edificación a la cual se apliquen. En este estudio, se evaluaron, principalmente, elementos que permitieran aprovechar en mayor medida la ventilación natural, como antepecho de ventanas, ventanas pivotantes, rejillas y la chimenea solar. Adicionalmente se emplearon aislantes en el techo, sistemas de sombreado, techos fríos o frescos y la orientación de la vivienda es crucial en la búsqueda del confort térmico.

El estudio de [11] coincide en el uso de estas estrategias y la ventilación natural como principal fuente de confort térmico. Sin embargo, mencionan que es de suma importancia considerar en la fase de diseño el uso de aire acondicionado y ventilación mecánica, a fin de complementar las estrategias bioclimáticas aplicadas. También, es importante aplicar en conjunto con lo antes mencionado, sistemas de sombreado para reducir la temperatura interior. Para este último punto, se indica que son más eficaces los sistemas de sombreado

situados en el exterior que en el interior, representando temperaturas menores en 1 o 2°C en comparación con el presente estudio.

Por otro lado, en el estudio [10], también se destaca la influencia del uso de sistemas de sombreado y aislamiento en las paredes en la reducción de la demanda total de energía de refrigeración (70% aproximadamente). Confirmando lo antes expuesto y lo presentado en este estudio, [8] evidencian que el uso de sistemas de sombreado y techos impermeabilizados logran reducir el uso de sistemas de refrigeración, como el aire acondicionado y/o ventilación mecánica, presentando ahorros de hasta 10% en el consumo energético por climatización.

De los resultados analizados en la sección 3.1 de la evaluación térmica para el Edificio 1, se observó que utilizar la ventilación natural nocturna permite reducir la temperatura operativa por lo menos dos grados respecto al caso base, en esto influye también la orientación del edificio y el uso de persianas en las ventanas en las horas que estas permanecen cerradas para evitar el aumento de la temperatura interior. [11], se evaluaron diversas estrategias para un edificio residencial, y para el caso en el que evalúan el efecto de sombra utilizando persianas, orientando la edificación al sur y la ventilación natural, se logra reducir la temperatura operativa por lo menos cuatro grados. Cabe destacar que en este estudio se utiliza un sistema de control para usar la ventilación natural, aire acondicionado y ventilación mecánica según lo requiera el recinto para mantener el confort. Adicionalmente, los cálculos fueron realizados utilizando una tasa de renovación de aire de 90, mientras que en la presente investigación el valor mayor alcanzado para más favorable (caso 4) fue de 45 ACH.

5. CONCLUSIONES

La presente investigación tuvo por objetivo evaluar el rendimiento térmico y energético de la edificación en estudio, en la que se evaluaron cuatro casos, en los cuales se estudió la factibilidad del uso de la ventilación natural y el aire acondicionado para alcanzar el confort térmico. Se evaluó de igual manera el rendimiento energético del uso del aire acondicionado y los beneficios de la iluminación natural en este aspecto y, por consiguiente, las ventajas de implementar un sistema fotovoltaico. Por lo tanto, se concluyó lo siguiente:

- El potencial climático de ventilación natural (PCVN) se ve influenciado de manera significativa por la humedad presente en el clima de Panamá, ya que, el máximo PCVN calculado fue de 20% de horas al año en las que el clima era favorable para el uso de la ventilación natural. Este porcentaje se considera muy bajo a pesar de que se lograron alcanzar temperaturas dentro del rango de confort en gran parte del año. Sin embargo, la humedad relativa se mantiene por encima del 70% más de la mitad del año.
- En el cálculo de las horas satisfechas de ventilación natural (HSVN), se consideraron otros factores, como la tasa de renovación del aire, la temperatura del aire, temperatura

radiante, temperatura operativa y temperatura exterior de bulbo seco, que permitieron obtener el número máximo de horas en el que el aire exterior es favorable para la ventilación natural según el 80% de aceptabilidad de ASHRAE 55. Utilizando estos factores, se obtuvo que un 70% para el Edificio 1 de las horas en el año favorables para la ventilación natural, evidenciando que se pueden satisfacer los requisitos de confort térmico interior utilizando la ventilación y complementándola con medidas activas de climatización, como lo puede ser el uso de ventilación mecánica y/o aire acondicionado.

- Otro parámetro importante que influyó en el confort térmico interior de ambos edificios es la orientación de ellos, ya que al estar la construcción orientada al sur gran parte del año el viento fluye en dirección de las ventanas principales de la edificación y el sol no incide directamente en ellas, por lo que, de haber estado orientada en dirección de la salida o puesta del sol, la temperatura interior sería mucho más elevada.
- En lo que a rendimiento energético se refiere, un componente que permite lograr ahorros significativos es el uso del control lineal para aprovechar al máximo la luz natural. Esto permite obtener ahorros de hasta un 48% del consumo energético por luminarias.
- El uso de aire acondicionado en el caso evaluado (caso 4) fue propicio para que la edificación pudiera situarse dentro del rango de confort térmico sugerido; no obstante, utilizando únicamente la ventilación natural, la edificación no se encontró en un punto crítico de calor.
- El uso de fuentes de energía renovables ayuda en gran medida a reducir e incluso compensar las emisiones de CO₂ generadas por las actividades humanas, como es el caso de las emisiones indirectas por el consumo energético. Es decir, que reducen la huella de carbono.

AGRADECIMIENTO

Al grupo de investigación Energética y Confort en Edificaciones Bioclimáticas (ECEB) parte de la Facultad de Ingeniería Mecánica, de la Universidad Tecnológica de Panamá. Esta investigación fue financiada por la SENACYT, bajo el proyecto IDDS22-30, así como apoyada por la Fundación Innova y el Sistema Nacional de Investigación (SNI). Un agradecimiento especial, a la Arquitecta Angela Collado de Mendes DaSilva por ceder los planos de la edificación que fue evaluada en esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Available at <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals>.
- [2] E. Soto-Estrada, F. Álvarez-Carrascal, J. Gómez-Lizarazo and D. Valencia-Montoya, *Confort térmico en viviendas de Medellín*, Issn 18 (2019), pp. 2248–4094.

- [3] I. Blasco Lucas and L. Hoesé, *Definición de estrategias de acondicionamiento térmico edilicio para San Juan a partir de un 11 año tipo climático*, Arquitecno (2016), pp. 21.
- [4] I. Blasco Lucas, *Rehabilitación sustentable de vivienda barrial masiva en clima semi-árido: Evaluación termo-energética y microeconómica*, Informes de la Construcción 73 (2021), pp. e375–e375.
- [5] I. Blasco Lucas, *Rehabilitación sustentable de vivienda barrial masiva en clima semi-árido: Evaluación termo-energética y microeconómica*, Informes de la Construcción 73 (2021), pp. e375–e375.
- [6] *Etiquetado de Viviendas*. Available at <https://etiquetadoviviendas.mecon.gob.ar/>.
- [7] D. Kuchen, Ernesto; Kozak, *Energética en la Evaluación de la Vivienda Social. Caso De Estudio : Vivienda de Barrio Papa Francisco*, Revista Hábitat Sustentable 10 (2020), pp. 44–55.
- [8] O.-C. Palacios-Hernandez, Rodriguez-Leon,, Gomez-Rodriguez; and Ovando-Chacon, *Simulación del consumo termo-energético de tres viviendas en Veracruz , México usando EnergyPlus*, Veracruz, México, 2020.
- [9] I. Sobhy, A. Brakez and B. Benhamou, *Analysis for thermal behavior and energy savings of a semi-detached house with different insulation strategies in a hot semi-arid climate*, Journal of Green Building 12 (2017), pp. 78–106.
- [10] A. Shandilya, M. Hauer and W. Streicher, *Optimization of thermal behavior and energy efficiency of a residential house using energy retrofitting in different climates*, Civil Engineering and Architecture 8 (2020), pp. 335–349.
- [11] A. Figueroa-Lopez, A. Arias, X. Oregi and I. Rodríguez, *Evaluation of passive strategies, natural ventilation and shading systems, to reduce overheating risk in a passive house tower in the north of Spain during the warm season*, Journal of Building Engineering 43 (2021), pp. 102607.
- [12] C. Chamorro González, L.V. Hoepfner Gutiérrez, C. Montaña Gallego and I.V. Ríos Londoño, *Procesos de gestión : los edificios sostenibles frente a los edificios tradicionales* , Act 17 (2019), pp. 177–203.
- [13] M. Chen Austin, M. Castillo, K. Carrizo, Á. De Mendes Da Silva and D. Mora, *Evaluación del rendimiento térmico y estrategias bioclimáticas de un edificio Universitario en clima tropical húmedo*, Revista de Iniciación Científica 7 (2021), pp. 16–23.
- [14] *What Is PMV? What Is PPD? The Basics of Thermal Comfort*. Available at <https://www.simscale.com/blog/what-is-pmv-ppd/>.
- [15] E.L. Didoné, *Parametric study for net zero energy building strategies in Brazil considering semi-transparent PV windows* Department of Architecture, Karlsruhe Institute of Technology – KIT, 2020.
- [16] C. Zomer, J. Urbanetz and R. Rütther, *On the compromises between form and function in grid-connected building-integrated photovoltaics (BIPV) at low-latitude sites*, 30th ISES Biennial Solar World Congress 2011, SWC 2011 3 (2011), pp. 2204–2214.
- [17] *Legislative Region Templates - Emissions*. Available at https://designbuilder.co.uk/helpv7.0/Content/Legislative_Region_Templates_-_Emissions.htm.
- [18] N. Yoon, L. Norford, A. Malkawi, H. Samuelson and M.A. Piette, *Dynamic Metrics of Natural Ventilation Cooling Effectiveness for Interactive Modeling*, Build Environ 180 (2020), pp. 1–39.
- [19] Secretaría Nacional de Energía, *Anexo N.º1*, 2016.
- [20] CASALS, *Cómo calcular las renovaciones por hora según la actividad de un local*, 2019.
- [21] J.L. Fumadó, *Principios físicos: ventilación+ humedad+ ábacos psicrométricos.*, 2019.
- [22] J.L. Fumadó, *Principios físicos: ventilación+ humedad+ ábacos psicrométricos.*, 2019.
- [23] J. Zhou, X. Zhang, J. Xie and J. Liu, *Occupant's preferred indoor air speed in hot-humid climate and its influence on thermal comfort*, Build Environ 229 (2023).