

Evaluación de normativas y estándares para la certificación energética de edificaciones residenciales en climas tropicales: Un enfoque para Colombia

Assessment of regulations and standards for energy certification of residential buildings in tropical climates: A focus on Colombia

Nancy Alejandra Agudelo Fernández^{1*}  <https://orcid.org/0000-0003-4759-8946>

Luciano Emilio Belandria Uzcategui¹  <https://orcid.org/0000-0003-2526-5841>

Luis Sainz Sopera²  <https://orcid.org/0000-0002-5670-0669>

Recibido 07 de febrero de 2025, aceptado 30 de diciembre de 2025

Received: February 07, 2025 Accepted: December 30, 2025

RESUMEN

En una construcción, la capacidad de ahorro de energía relacionada con la eficiencia energética corresponde al tipo y las diferentes formas en que estas se consumen, destacando como medidas el equipamiento energético y la integración de sistemas de generación de energía, en particular energía eléctrica para satisfacer demandas locales. Este artículo analiza normativas y estándares internacionales para la certificación energética de edificaciones residenciales, con énfasis en su aplicabilidad al clima tropical de Colombia, evaluando fortalezas, limitaciones, así como su capacidad para optimizar el consumo energético. El estudio se basó en una metodología con enfoque comparativo, analítico de material teórico documental y normativo de tres sistemas principales: LEED, Passivhaus y el código técnico de la edificación (CTE) y en tres criterios específicos: sistemas de aislamiento, la calidad del aire interior (IAQ) y el consumo de energía. Del presente análisis se puede inferir que si bien los entes u organismos encargados de gestionar la eficiencia energética en Colombia identifican las medidas que pueden contribuir al mejoramiento de la eficiencia en las edificaciones, también parecen estar claros en que la implementación de estas medidas como una regulación debe ser un proceso progresivo y prolongado, ya que esto implica estrategias que se acompañen de incentivos, beneficios y apoyos gubernamentales tanto nacionales como regionales. Este análisis es relevante para el diseño de políticas públicas que promuevan edificaciones sostenibles en climas tropicales, ofreciendo una guía práctica de criterios para abordar los retos de la transición energética en países en vías de desarrollo.

Palabras clave: Herramientas de certificación, eficiencia energética, vivienda unifamiliar, clima tropical, LEED, Passivhaus, CTE.

ABSTRACT

In a building, the energy-saving capacity associated with energy efficiency depends on the type and the different ways these are consumed, highlighting measures such as energy-efficient equipment and the integration of energy generation systems, particularly electricity generation, to meet local demand. This

¹ Corporación Universitaria del Meta. Escuela de Ingenierías. Programa de Ingeniería Eléctrica. Villavicencio, Colombia. Email: nancy.agudelo@unimeta.edu.co; luciano.belandria@unimeta.edu.co

² Universidad Politécnica de Catalunya. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona (ETSEIB). Barcelona, España. Email: luis.sainz@upc.edu

* Autor de correspondencia: agudeloalejandra24@gmail.com

article analyzes international regulations and standards for the energy certification of residential buildings, emphasizing their applicability to Colombia's tropical climate by assessing their strengths, limitations, and their capacity to optimize energy consumption. The study was based on a comparative-analytical methodology involving theoretical, documentary, and regulatory materials from three main systems: LEED, Passivhaus, and the technical building code (CTE), and focused on three specific criteria: insulation systems, indoor air quality (IAQ), and energy consumption. From this analysis, it can be inferred that although the entities responsible for managing energy efficiency in Colombia identify measures that could improve building efficiency, they also acknowledge that implementing these measures as formal regulation must be a progressive, prolonged process. This transition requires strategies supported by incentives, benefits, and government support at both the national and regional levels. This analysis is relevant for the design of public policies that promote sustainable buildings in tropical climates, offering a practical framework to address the challenges of the energy transition in developing countries.

Keywords: Certification tools, energy efficiency, single-family housing, tropical climate, LEED, Passivhaus, CTE.

INTRODUCCIÓN

Resulta conocido que el sector de la construcción es clave para la resiliencia frente al cambio climático [1], [33], ya que permite establecer objetivos realistas para reducir el gasto de energía y regular el efecto de los gases de efecto invernadero (GEI), manteniendo su funcionalidad. Sin embargo, en países donde el proceso de la transición energética aún es muy joven es importante identificar los axiomas que pueden servir de puntos de partida para garantizar acciones dentro del sector que pueden acelerar la descarbonización mediante un proceso de calificación y certificación para las construcciones que sea viable y realmente eficiente en función del rendimiento energético. La configuración correcta de estrategias en dirección al cumplimiento de estos objetivos, puede proporcionar un ritmo razonable y beneficioso que permita lograr las reducciones necesarias dentro del plazo solicitado por la comunidad internacional y en consecuencia la comunidad científica. Actualmente la operación de los edificios representa el 30% del consumo global de energía final y el 26% de las emisiones globales vinculadas al uso energético, de las cuales el 8% corresponde a las emisiones directas y el 18% restante corresponde a las emisiones indirectas por el uso de la electricidad [2]. En general los estándares, códigos y normativas destinados a la evaluación energética y la sostenibilidad de las construcciones están siendo fortalecidos, con un enfoque creciente en tecnologías y técnicas de construcción eficientes y sostenibles [1]. Sin embargo, es imperativo acelerar aún más estos cambios para lograr la meta de emisiones netas cero para 2050, en el sector. La próxima década resulta

crucial para implementar las medidas necesarias que aseguren que todos los nuevos edificios y una parte significativa de los edificios existentes sean compatibles con la eliminación de emisiones de carbono [3], [4].

Las construcciones tienen una larga vida útil [5], lo que implica que su impacto ambiental y energético será perdurable en el tiempo. Por tanto, la adaptación y adopción de nuevas tecnologías tanto para edificios existentes como de nueva construcción representan una oportunidad única para lograr ahorros significativos mediante prácticas y tecnologías eficientes [6]. Existen diferentes normas y estándares de certificación energética reconocidos por su alcance, su aplicación en diferentes condiciones climáticas y la variedad de criterios considerados para la certificación. Este artículo se propone identificar las prácticas y criterios comunes, los recursos y los niveles designados según las características adecuadas al clima, en correspondencia con las exigencias de las políticas gubernamentales referidas al uso eficiente de la energía, con el objetivo de valorar el proceso colombiano en este ámbito. El gasto de energía en el sector residencial es consecuencia del: equipamiento, hábitos de uso de la población, el clima, los ingresos y factores culturales [6]. Estos elementos tienen un impacto en el sobre dimensionamiento y el número de cargas de calefacción o refrigeración, así como en algunos equipos de ocio. Dado que muchos de estos factores escapan de medidas regulatorias, es importante lograr opciones desde una perspectiva energética, proponiendo actualizaciones en las diferentes normativas, estándares y regulaciones que se inclinen en la definición, aplicación y uso de

herramientas adecuadas a la realidad de cada región, en aspectos como la iluminación, electrodomésticos, gasodomésticos y especialmente en el diseño y construcción de: envolventes, aislamientos, ventanas y puertas ya que son puntos críticos de pérdidas de calor y refrigeración en la mayoría de las construcciones ubicadas en los climas tropicales.

CLAVE DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

Las normas, reglamentos o estándares apropiados para la evaluación de la eficiencia y sostenibilidad energética de una edificación, en general, deben satisfacer el confort para el desarrollo de las actividades propias al lugar de estadía, y a partir de esto se derivan una serie de estrategias, destinadas a conservar en cualquier instante del tiempo y bajo ciertas características climáticas esta satisfacción respecto al consumo de energía, reconocido como bienestar térmico [7], sin embargo este objetivo inicial no es fácil; debido a la gran variedad de climas, geografías y culturas. En el contexto de la búsqueda de la eficiencia energética, la implementación de acciones orientadas a la preservación del entorno natural y el ambiente, así como la reducción de la generación de gases responsables del efecto invernadero, la evaluación y certificación de las construcciones, es una solución factible y viable [8] y por ello que existen asociaciones, organismos y gobiernos que han desarrollado e implementado sistemas que satisfacen criterios de eficiencia que han evolucionado en el tiempo como instrumentos capaces de adaptarse y ajustarse a las nuevas tecnologías, productos y prácticas que se proponen para satisfacer la meta establecida por los organismos internacionales, fundamentales para coordinar la acción global contra el cambio climático.

La estrategia de certificación de los edificios, históricamente, se basó en la evaluación de los consumos de climatización y agua caliente sanitaria (ACS), la aplicación de aislamiento térmico y la inspección periódica de los equipos de calefacción como lo expresa la directiva 93/76, que se desarrolló en el marco del UNFCCC (*United Nations Framework Convention on Climate Change*) [9], luego la directiva 2002/91/CE del parlamento europeo [10], estableció un marco normativo de obligatorio cumplimiento, basándose principalmente en el establecimiento de una metodología de cuantificación de la eficiencia energética, lo que establece una forma de medir la

eficiencia energética, donde se toma en cuenta además de los aspectos expresados por la directiva 93/76, las instalaciones de calefacción y aire acondicionado, el diseño del edificio y el aprovechamiento de energías no convencionales, por ejemplo la implementación de sistemas solares para calefacción y producción de electricidad. La directiva 2010/31/UE [11], introduce la gestión de la demanda de energía como un instrumento importante para optimizar el consumo energético de los edificios, entendiendo que la metodología de cálculo puede ser particularizada a nivel nacional y regional, así como las necesidades de climatización a lo largo del año. La directiva hace una retrospectiva de los factores tomados en cuenta, actualiza sus efectos, e incluye nuevos factores a tomar en cuenta; como el uso de energía procedente de fuentes no contaminantes, incorporación de elementos pasivos para todo lo relacionado con la climatización, control solar pasivo, bienestar y calidad del aire interior, luz natural en interiores, la planificación arquitectónica y el ciclo de vida de los edificios. Una de las grandes fortalezas de esta directiva es que incluye, medidas para reducir barreras jurídicas, fortalecer los intercambios comerciales e incentivar las inversiones financieras, y obvio, cooperar al mejoramiento de la eficiencia energética de las edificaciones nuevas y existentes, conduciendo a disminuir la pobreza energética [11].

El panorama energético actual de la Unión Europea está afectado por el conflicto entre Ucrania y Rusia. Con lo cual el cumplimiento del compromiso para reducir su consumo energético y limitar el aumento de la temperatura global puede ser suavizado, sin embargo, establecen la directiva 2023/1791 [12] como parte del *Fit for 55*, en la que se retoma el principio de “primero, la eficiencia energética” [13], lo que implica:

Adoptar un enfoque holístico que tenga en cuenta la eficiencia global del sistema energético integrado, la seguridad del suministro y la rentabilidad y que promueva soluciones más eficientes para la neutralidad climática a lo largo de toda la cadena de valor, desde la producción de energía y el transporte por la red hasta el consumo de energía final, de modo que se obtenga eficiencia tanto en el consumo de energía primaria como en el consumo de energía final [13].

Esta directiva [13], incluye criterios para sectores como los edificios públicos, el transporte y la

industria de las tecnologías digitales. En cuanto a las edificaciones residenciales refuerza el proceso de la renovación de los edificios existentes a través de la asequibilidad de los recursos, suministros y materiales. De la misma manera destaca la evaluación de la huella de los combustibles fósiles, estimulado el estudio de diseños que propicien la reutilización y el reciclado de los materiales a través de un plan de economía circular. Incentiva la inclusión de sistemas de automatización y control en edificios como una forma de gestión activa de la energía, promueve la sustitución de equipamiento de combustibles fósiles, entre otras medidas y es claro que, el crecimiento en la cantidad de construcciones energéticamente eficientes concurre a disminuir el uso de energía.

Como resultado de esta necesidad de mejorar el consumo de energía final global y las emisiones concernientes con la demanda de energía en las edificaciones, han surgido una serie de estándares y normativas, que han demostrado tener éxito en su propósito, por lo cual han sido adoptados en muchos países. De esta forma se reconocen un gran número de instrumentos de certificación energética y medioambiental, cuyo enfoque es la sostenibilidad, así como, instrumentos de certificación de construcción cuyo enfoque es controlar la demanda y el consumo energético con la finalidad de medir la eficiencia energética, en este orden de ideas, a continuación, se muestra la Tabla 1 con algunos de ellos [14]-[18].

El presente artículo busca comparar los criterios a tomar en cuenta en la evaluación de las edificaciones por ser consideradas eficientes en el uso de la energía en instrumentos voluntarios como lo son los estándares: el *Passivhaus* y el LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) y un instrumento obligatorio como el código técnico de la edificación (CTE) de España. Dentro del análisis, se incluirá el uso de sistemas de aislamiento como parámetro importante para limitar la demanda térmica, en función del uso de sistemas HVAC. De igual manera se incluirá la tasa de renovación del aire en consonancia con la calidad del aire interior (IAQ) en relación a la presencia de contaminantes, temperatura, humedad, y circulación del aire, lo que coadyuva al bienestar de los habitantes, y finalmente el consumo de energía para satisfacer las demandas de confort dentro de la vivienda. Con este análisis, se busca identificar las estrategias con mayor factibilidad de adaptación al clima tropical presente en Colombia.

Estándar *Passivhaus*

El estándar *Passivhaus* tiene su origen en el concepto de casa pasiva, desarrollado en 1988 por los profesores Bo Adamson, de la Universidad de Lund en Suecia, y Wolfgang Feist, del Instituto Für Wohnen und Umwelt (Instituto para la edificación y el medio ambiente) [20]. Este concepto consiste en reducir la demanda de energía de las construcciones tomando en cuenta: diseño, condiciones climáticas, materiales y orientación con la finalidad de tener calidad de ambiente interior [20]. Reducir la demanda, implica disminuir el consumo energético de funcionamiento, aminorando el uso de medidas activas de refrigeración y calefacción. El sistema fue creado para ser aplicado en climas fríos, sin embargo, el estándar se puede adaptar a climas más cálidos [20]. Para esto se deben satisfacer una serie de criterios constructivos y técnicos que define el estándar, los cuales se mencionan a continuación [19]:

Demanda térmica anual máxima de 15 kWh/m²: la demanda puede incluir el uso de refrigeración y calefacción, manteniendo el requerimiento máximo de energía por sistema de calefacción y refrigeración es de 15 kWh/m² año. Conservar la demanda en este rango implica realizar un balance entre las pérdidas y ganancias energéticas a través de la envolvente térmica, infiltraciones, puentes térmicos y las ganancias internas como: ocupación y ganancia de calor interno a través de acristalamientos, uso de electrodomésticos, entre otros.

El aislamiento cobra especial importancia, para garantizar una temperatura interior confortable, para ello el coeficiente de transmitancia térmica (U) de los componentes opacos debe ser inferior a 0,15 W/(m² °K) y en los translúcidos debe ser inferior a 0,85 W/(m² °K), asegurando unas prestaciones especiales de filtrado en los acristalamientos [20]. Los valores específicos pueden variar ligeramente dependiendo del clima y la ubicación del edificio, con lo cual, cuanta más diferencia de temperatura hay entre el exterior y el interior, más importante es el papel del aislamiento térmico [21]. En un clima tropical o en verano, el exceso de aislamiento térmico puede dificultar la disipación del calor en el interior de una vivienda, sin embargo, el estándar *Passivhaus* puede abordar este problema mediante el control de las cargas solares a través de estrategias bioclimáticas y ventilación [22]. Así mismo, es importante tener un aislamiento térmico continuo

Tabla 1. Instrumentos para medir la eficiencia energética.

Nombre Condición	BREEAM [14]	Minergie [15]	House Energy Labelling Act [16]	DGNB [17]	NOM-020- ENER-2011 [18]
Origen	Reino Unido	Suiza	Dinamarca	Alemania	México
Tipo de certificación	Estándar	Estándar	Legislación	Legislación	Norma
Implementación	Voluntario	Voluntario	Obligatorio	Obligatorio	Obligatorio
Tipo de calificaciones	– Outstanding – Excellent – Very Good – Good – Pass – Unclassified	– Minergie – Minergie-P – Minergie-A	Etiqueta energética que clasifica su eficiencia de A (más eficiente) a G (menos eficiente).	– Bronce – Plata – Oro – Platino – Diamante – Climate positive	Etiqueta que establece el porcentaje de ahorro de energía del edificio proyectado con respecto al de referencia.
Categorías o factores a evaluar	– Agua – Energía – Transporte – Salud y bienestar – Uso de la tierra – Materiales – Gestión de residuos – Contaminación, etc.	– Aislamiento térmico. – Ventilación con recuperación de calor. – Consumo total de energía primaria. – Uso de energías renovables.	– Aislamiento - Consumo de energía para: • Calefacción • Agua caliente • Ventilación • Electricidad	– Ecología – Economía – Aspectos socioculturales – Tecnología – Flujos de trabajo de los procesos y emplazamientos	– Flujo de calor a través de la envolvente.
Método de calificación	Comparación del proyecto a evaluar con el proyecto BREEAM de referencia.	Cumplimiento de criterios relativos al tipo de calificación.	Software de simulación para calcular el consumo de energía primaria.	Cada criterio dentro de las categorías tiene un valor ponderado de acuerdo con su importancia. Puntuación máxima 100 puntos.	Comparación de la ganancia total de calor del Edificio Proyectado (EP) con la ganancia del Edificio Referencia (ER) con características iguales al EP.
Tipo de edificaciones	– Nueva – Reacondicionada – Gestión de edificios – Comunidades	– Nuevas – Renovadas	– Residenciales – Comerciales – Públicas – Industriales – Uso Mixto	– Edificios Nuevos – Edificios en Uso – (In-use) – Renovaciones – Certificación de Interiores	– Nuevas – Renovadas

Fuente: Elaboración propia.

para evitar los puentes térmicos y una ventilación natural o cruzada para enfriar la vivienda, siempre y cuando no sea en momentos de máxima o mínima temperatura y garantizar el confort térmico interior.

La construcción debe tener una envolvente con un grado de estanquidad de 0,6 volúmenes/h, el estándar *Passivhaus* exige como requisito para la hermeticidad el cumplimiento de la norma EN132829. La función de la hermeticidad es evitar condensaciones y pérdidas de energías que pueden ser provocadas por corrientes de aire, además aporta aislamiento acústico [22]. Para comprobar el nivel de hermeticidad, se hace a través del test

Blower Door, el cual consiste en crear una presión diferencial constante de 50 pascales (ACH50) entre la parte interior y exterior de la construcción, esta presión diferencial permite medir la cantidad de aire que entra o sale a través de las filtraciones no intencionadas, en consecuencia, genera cargas de calefacción y refrigeración [23].

La ventilación, es un aspecto importante ya que sirve para asegurar la calidad del aire interior. El flujo de ventilación del aire garantiza que la concentración de CO₂ en una vivienda se mantenga en niveles saludables, una concentración de CO₂ superior a 0,015% se considera de mala calidad [25]. La

norma UNE-EN 13779:2005 [26] recomienda para ambientes interiores considerar como indicador de la calidad del aire interior una concentración máxima de 1.000 ppm de CO₂ producido en la respiración de los ocupantes de un edificio [24].

El estándar *Passivhaus* contempla el uso de la ventilación con recuperación de calor, dentro del cual se hace la transferencia del calor del aire saliente al aire fresco entrante, sin perder energía térmica. El estándar establece una ventilación de 30 m³ por persona y hora para edificios de uso residencial, y los caudales de admisión y extracción de aire deben estar equilibrados, con un desfase máximo del 10% entre ellos [21].

El consumo de energía primaria ha de ser de 120 kWh/m²/año, esto cubre todas las necesidades energéticas del edificio, tales como calefacción, refrigeración, ACS, ventilación, iluminación y electrodomésticos [27]. Este valor incluye todas las fuentes de energía utilizadas dentro del edificio y está especificado para limitar el impacto ambiental del uso de la energía. Para lograrlo, se garantiza minimizar la demanda energética mediante un buen diseño, aislamiento térmico, ventilación eficiente, y uso de energías renovables cuando sea posible [27].

El estándar *Passivhaus* fue concebido para centrarse en la creación de viviendas altamente eficientes desde el punto de vista constructivo, que garantiza el confort térmico de sus habitantes [27]. El estándar ha evolucionado incorporando sistemas de generación de energía renovables, esto debido al proceso acelerado del cambio climático y las directivas de la Unión Europea que exigen una reducción progresiva de la dependencia de combustibles fósiles. Sin embargo, el *Passivhaus* mantiene su esencia de lograr construcciones de “zero” consumo.

Estándar LEED (Leadership in Energy and Environmental Design)

LEED es un procedimiento de evaluación respaldado por el Consejo de la Construcción Verde de Estados Unidos (USGBC) en 1998 [28]. LEED v5 es la versión más reciente de LEED, actualmente la versión LEED v4 se mantiene en un periodo de superposición con la versión 5, se espera que en el transcurso de 2024-2025 sea validado por los miembros USGBC y el público usuario [28].

El proceso de certificación se basa en un sistema de 110 puntos repartidos en tres grupos objetivos denominados: descarbonización, calidad de vida y conservación, y restauración ecológica. Los puntos, se obtienen a través de créditos asignados a diferentes tipos de categorías, que cubren los criterios definidos por los grupos objetivos entre las que se encuentran: Proceso integrativo, planificación y evaluaciones, ubicación y transporte (LT), sitios sostenibles (SS), eficiencia del agua (WE), energía y atmosfera (EA), materiales y recursos (MR), calidad ambiental interior (EQ) y prioridades del proyecto e innovación (EN) [28].

El sistema de calificación LEED, en cada categoría incluye créditos concatenados con una serie de acciones específicas, que abordan diferentes aspectos de sostenibilidad que un proyecto puede implementar para cumplir con alguno de los criterios establecidos. El sistema asigna los puntos basados en la contribución de cada criterio al desempeño ambiental del proyecto. Además de los créditos, existen prerequisites que son obligatorios, aunque no otorgan puntos adicionales.

Los créditos en las diferentes categorías de LEED pueden contribuir simultáneamente a los tres grupos objetivos, lo que permite una mayor flexibilidad en la certificación del proyecto. La descarbonización, corresponde al objetivo de mayor peso, debido a su importancia en la reducción de emisiones de carbono y en el cumplimiento de los requisitos climáticos. Este objetivo, incluye estrategias para disminuir el uso de combustibles de origen fósil y promover el empleo de energías limpias.

En el análisis de los créditos LEED [28], se observa que los criterios constructivos y técnicos analizados para la certificación del estándar *Passivhaus*, se encuentran inmersos dentro de estos créditos. Sin embargo, el sistema LEED abarca una gama más amplia de créditos que no solo se relacionan con la construcción, también incluye aspectos relacionados con la sostenibilidad y el impacto ambiental del espacio físico que puede ocupar la edificación, lo que da mayor oportunidad de obtener algún tipo de certificación a la edificación.

Dado que el caso considerado son edificaciones de uso residencial, se tomará en cuenta lo especificado por la tipología LEED para nuevas construcciones,

que incluye edificios con grandes remodelaciones, y lograr el objetivo de comparación con el estándar (*Passivhaus*) y reglamento seleccionado (CTE).

Para los efectos de la aplicación del estándar LEED, se debe definir una zona climática la cual se elige de acuerdo a lo establecido en la norma Ashrae 169-2013 [29]. Colombia está dentro de la zona tropical, con lo cual las condiciones medias del territorio, es un clima cálido y templado (20 °C - 35 °C), con grandes niveles de humedad (> 50%) [30], [35].

Dentro del modelo de la norma Ashrae 169-2013, la condición climática general de Colombia corresponde con una zona entre 1A - 2A, que concierne a clima muy caliente y húmedo y caliente y húmedo, respectivamente [29]. Sin embargo, Colombia está clasificada dentro del grupo climático 2A [32], como clima predominante, con lo cual, y tomando en cuenta ambos criterios, para los efectos de este documento la zona climática a tomar en cuenta será 2A. En los términos establecidos para la comparación, la nueva versión de LEED dentro de la categoría energía y atmosfera (EA) [28] establece un prerrequisito de eficiencia energética mínima, el cual dispone cumplir con la norma ASHRAE/IES 90.1 [32]. Bajo estos términos, los niveles de transmitancia para la envolvente son: 0,701 W/m² °K para paredes, 0,25 W/m² °K para fenestración vertical, 0,220 W/m² °K para techos y 0,496 W/m² °K para pisos.

En cuanto a la hermeticidad, si bien es cierto que tanto el *Passivhaus* como el LEED buscan mejorar la eficiencia energética a través de la minimización de las fugas o infiltraciones de aire; ambos establecen indicadores diferentes, ya que el *Passivhaus* lo relaciona a través de la estanquidad medida; el LEED lo hace a través de lo establecido en la norma ASHRAE 90,1 sección 5, definido por una tasa de fuga de aire que no debe ser superior a 1,7 L/s·m² bajo una presión diferencial de 75 Pa, la prueba de presurización se debe hacer de acuerdo a la norma ASTM E3158.

En términos de consumo de energía para satisfacer las demandas de confort dentro de la edificación, el LEED hasta la versión v4, ha sido cuestionado debido a que cuantifica en función de la fuente de energía que menos gases de efecto invernadero (GEI) genere [19], sin considerar el uso de energía en sitio o el requerimiento de energía primaria, es

decir, considerar todas las fases de la producción de energía, como lo hace el *Passivhaus*. La versión v5, en la categoría energía y atmosfera (EA) establece un requisito previo denominado Proyección operativa de carbono y plan de descarbonización, que permite visualizar el desempeño de la edificación en función de las emisiones de carbono operativas [28]. LEED no establece un límite absoluto de consumo de energía, basa su calificación por lo establecido en la Norma Ashrae 90,1, en el caso de estudio se incluirán: capítulo 6: calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC), capítulo 7: agua caliente, capítulo 8: potencia y capítulo 9 alumbrado.

Frente al uso de sistemas HVAC, la norma 90,1 establece que los equipos a instalarse en edificaciones nuevas deben contar con el certificado de la Energy Policy Act (EPACT), y cumplir con lo especificado por el Departamento de Energía (DOE) en el caso de EEUU. Para el uso de aires acondicionados, en particular en la capacidad < 19 kW en la subcategoría tipo Split (trifásico o monofásico), la norma establece una eficiencia máxima de 3,93 SCOP (Coeficiente estacional de rendimiento de enfriamiento) sujeto al método utilizado por el equipo para disipar el calor, lo que permite agrupar los equipos según sus características técnicas y su desempeño energético [31]. En cuanto a la instalación en físico, también deben cumplir con las condiciones de aislamiento prescritas en la norma.

Con respecto al ACS el capítulo 7 de [32], sugiere el uso de las normas de ingeniería para el cálculo y dimensionamiento de la carga, asimismo establece requisitos de aislamiento para las tuberías, eficiencia mínima para los equipos de calentamiento de agua y la implementación de medios de control para limitar la temperatura máxima del agua suministrada en los baños a 43 °C. El capítulo 8: Energía, establece criterios de control y sistemas de medición del consumo de la energía, así como la eficiencia del transformador en función de la cantidad de potencia, pero no limita la cantidad de energía por servicio.

La norma ASHRAE 90,1 capítulo 9 establece lineamientos clave para optimizar la eficiencia energética en las viviendas residenciales, a través de requisitos específicos para los sistemas de iluminación. Define que las lámparas o luminarias deben cumplir con estándares mínimos de eficacia, ya sea mediante lámparas de alta eficiencia (>75

lm/W) o luminarias con valores totales de al menos 50 lm/W. Además, se requiere que el 50% de las luminarias interiores cuente con controles como reguladores de intensidad o mecanismos automáticos para apagarlas después de un período de tiempo sin ocupantes. En cuanto a la iluminación exterior, exige la implementación de controles manuales y automáticos que apaguen las luminarias según criterios de: horarios, luz natural disponible o ausencia de actividad, excepto en instalaciones de baja potencia.

Este conjunto de disposiciones busca reducir el consumo energético y fomentar la sostenibilidad en el ámbito residencial, proporcionando un marco normativo claro para la evaluación de la eficiencia energética.

Código técnico de la edificación (CTE)

El código técnico de la edificación (CTE) de España, aprobado por Real Decreto 314/2006, es la normativa que establece los requisitos básicos de calidad, seguridad y habitabilidad para edificios nuevos y existentes. Deriva de un largo proceso normativo iniciado en 1957 con las normas MV del Ministerio de la Vivienda, pasando luego a las Normas Básicas de la Edificación (NBE) en 1977 y consolidado con la Ley de Ordenación de la Edificación (LOE) Ley 38/1999. El CTE actualizado mediante el Real Decreto 450/2022, integra las directivas europeas sobre eficiencia energética y salubridad. Además, introduce un enfoque prestacional, impulsando tareas de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i), para cumplir sus criterios de manera flexible, fomentando la innovación tecnológica y el desarrollo sostenible, equilibrando métodos constructivos tradicionales con avances modernos [33].

El marco regulador en España para la edificación, está enmarcado en el código técnico de la edificación (CTE), a través del Documento Básico de Ahorro de Energía (DBHE). Este documento establece seis requisitos fundamentales que abarcan diversos aspectos relacionados con la calificación de la eficiencia energética, descritos de la siguiente manera: HE0 que limita el consumo de energía; HE1 regula las condiciones para controlar la demanda energética; HE2 define los requerimientos de los servicios térmicos; HE3 que establece las condiciones para la iluminación; HE4 que exige una contribución mínima de energías renovables para

satisfacer la exigencia de agua caliente sanitaria (ACS); HE5 que fija un mínimo de generación de electricidad a partir de fuentes renovables; y HE6 que determina los servicios mínimos necesarios para los vehículos eléctricos.

El CTE establece condiciones respecto al consumo energético de los edificios de acuerdo a su uso (residencial o no residencial), a la zona climática de emplazamiento, y en el caso de las construcciones existentes, el consumo depende la repercusión de la intervención. Para los efectos de la aplicación de la norma, la severidad climática se escoge de acuerdo con el Anejo B Zonas climáticas del DBHE [34]. La severidad climática se identifica a través de una letra, que representa la zona climática de invierno, y un número, que indica la zona climática de verano. Es claro, que Colombia no está contemplada dentro de las zonas climáticas establecida por el DBHE, como lo hace la norma Ashrae 90.1. Sin embargo, establece expresiones para la estimación de la severidad climática para invierno y verano (SCI y SCV respectivamente), estas expresiones fueron usadas de acuerdo a las condiciones de verano e invierno de Colombia, dando como resultado una zona climática: *a3*. Esta zona climática del DBHE existe en emplazamientos con características similares al clima tropical que prevalece en Colombia, como las Palmas de Gran Canaria o Santa Cruz de Tenerife, debido a su locación cercana al trópico de Cáncer. Ambas locaciones tienen las mismas zonas climáticas: *a3*; A2; B2 y C2 variando la zona según la elevación sobre el nivel del mar. Debido a la dificultad de establecer una altura promedio sobre el nivel del mar para todo el país, se utilizará como referencia la zona climática A2.

Según los criterios definidos para la comparación, el DBHE establece un límite para el uso de energía primaria no renovable de 25 kW·h/m²·año y un máximo de 50 kW·h/m²·año para el consumo total de energía primaria en edificios residenciales. Estos valores están destinados a cubrir los requerimientos energéticos de los distintos servicios como calefacción, refrigeración, agua caliente sanitaria (ACS), ventilación, control de iluminación y humedad. El balance energético necesario para verificar el cumplimiento de las exigencias establecidas en el DBHE debe calcularse siguiendo la norma UNE-EN ISO 52000-1:2019 [34], que regula la evaluación global de la eficiencia.

Para gestionar la demanda energética, los edificios deben contar con una envolvente térmica diseñada para reducir las necesidades de energía primaria y garantizar el confort térmico. Cada componente de la envolvente debe cumplir con los valores máximos de transmitancia térmica (U) establecidos según la zona climática. En el caso de la zona A2, los elementos opacos como muros y suelos (UM, US) deben tener una transmitancia inferior a $0,70 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{K})$, mientras que los muros, suelos y cubiertas en contacto con espacios no habitables o con el terreno (UT), así como las particiones interiores (UMD) de la envolvente térmica, deben presentar una transmitancia inferior a $0,80 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{K})$, los huecos entendidos como el conjunto de marco y vidrio (UH) debe ser inferior a $2,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{K})$ y para las puertas con superficie semitransparente igual o menor al 50% debe ser inferior a $5,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{K})$ [34]. Con respecto a la hermeticidad, el Documento Básico de Salubridad (DBHS) tiene como propósito minimizar los problemas de salud que pueda afectar a los ocupantes de los edificios, en condiciones normales de uso. También se pretende evitar el deterioro de la edificación y su entorno debido a elementos relacionados con el diseño, la construcción, el uso y el mantenimiento, así como factores de contaminación ambiental interna como el monóxido de carbono, la humedad, los olores, los compuestos orgánicos volátiles (COV) entre otros [36]. Para lograrlo, se establece que la concentración media anual de CO_2 en cada espacio habitable debe ser inferior a 900 ppm. Además, el intercambio de aire exterior debe ser suficiente para desplazar los contaminantes no apropiados para las personas, lo que se garantiza con un flujo mínimo de 1,5 l/s por espacio habitable [36].

El DBHS establece que edificios con una superficie útil superior a 120 m^2 , la prueba para determinar la relación de cambio de aire es la señalada por la norma UNE-EN 13829 conocido como [n50] [36], que coincide con el procedimiento usado por el Passivhaus, el método de blower door test. Además, el DBHS define las condiciones relacionadas con el diseño, los productos, la construcción y el mantenimiento necesarios para garantizar un nivel adecuado de estanqueidad al aire en los edificios.

El [34] en la exigencia básica HE3 condiciones de las instalaciones de iluminación, establece que los edificios usaran sistemas de iluminación eficientes que reduzcan el consumo energético, lo cual se

acompañara con sistemas de control de acuerdo a la ocupación de cada espacio y optimizará el uso de la luz natural en los lugares donde las condiciones lo permitan. Sin embargo, las instalaciones interiores de las viviendas se encuentran excluidas del ámbito de aplicación, pero esto no implica que se puedan atender estas recomendaciones.

Según lo indicado en el DBHE en la exigencia HE4, la demanda de referencia de agua caliente sanitaria (ACS) para edificaciones residenciales debe calcularse considerando un consumo de 28 litros diarios por persona a una temperatura de $60 \text{ }^\circ\text{C}$, ajustado según unos factores de ocupación. Asimismo, se establece que un mínimo del 70% del consumo energético anual dispuesta al ACS debe ser cubierta mediante el uso de fuentes de energía renovables.

El Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) define los requisitos para los sistemas HVAC, el agua caliente sanitaria (ACS) y los sistemas de automatización y control asociados. En este sentido, todos estos sistemas deben ajustarse al Real Decreto 187/2011, que regula los requisitos de diseño ecológico. Asimismo, deben cumplir con el Real Decreto 1390/2011, que establece las condiciones para los sistemas de regulación y control, asegurando que el diseño de los sistemas de climatización y el consumo energético se adaptan a las necesidades específicas. Además, el reglamento exige la incorporación de subsistemas que favorezcan el ahorro energético, la recuperación y el aprovechamiento de energías residuales [37].

Todos los equipos y materiales incorporados de forma permanente en los edificios deben cumplir con el marcado CE y el etiquetado energético, como lo define el Reglamento (UE) 2017/1369. De igual forma el RITE define la temperatura operativa y humedad relativa, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Temperatura y humedad relativa actual operativa.

Estación	Temperatura operativa ($^\circ\text{C}$)	Humedad relativa (%)
Verano	23-25	45-60
Invierno	21-23	40-50

Fuente: Reglamento de instalaciones térmicas en los edificios [37].

ANÁLISIS

Los requisitos establecidos por los estándares y la normativa, incorporados en el desarrollo del presente documento, para obtener una certificación de eficiencia energética, aunque coinciden en la mayoría de los aspectos, presentan diferentes niveles de exigencia y es evidente que ciertos requisitos son menos estrictos en la normativa definida por el Código Técnico de la Edificación (CTE), la cual, a pesar de su carácter obligatorio, adopta criterios más flexibles para garantizar que sean accesibles y aplicables por los ciudadanos. La norma del CTE ha sido progresiva al elevar los niveles de exigencia, logrando la transposición de las directivas europeas y dar cumplimiento a sus obligaciones y compromisos.

Colombia, maneja una serie de legislaturas destinadas a promover la eficiencia energética y el ahorro energético, como el RETIQ, la Resolución 0549 de 2015 del Ministerio de Minas y Energía, y la Ley 2099 de 2021, las cuales son normas obligatorias. El RETIQ exige el uso obligatorio de etiquetas que proporcionen información sobre el rendimiento de los equipos en cuanto a su consumo de energía y los indicadores de eficiencia [38].

La Resolución 0549 plantea los parámetros y lineamientos de construcción sostenible que aseguran el cumplimiento de estándares mínimos de ahorro de agua y energía en edificaciones. En el caso del ahorro de energía para las edificaciones de tipo residencial establece un porcentaje definido entre un 15% y un 40% anclado a una línea base de consumo promedio comprendido entre 34,6 kWh/m²-año hasta 53,6 kWh/m²-año en función de la zona climática, que en el caso de la Resolución [39] se establecen como: frío, templado, cálido seco y cálido húmedo, siendo la zona climática que prevalece en Colombia cálido húmedo. La Resolución 0549 propone una serie de recomendaciones de medidas activas y pasivas que se pueden implementar en las edificaciones, las cuales coinciden con las nombradas a lo largo de este documento, sin embargo, no establece valores límites o guías y es claro, que la implementación de las medidas de ahorro con carácter obligatorio a través de normativas para las edificaciones, depende de los lineamientos y la orientación a que las políticas de estado deseen apuntar, ya que esto conlleva a costos dentro de la construcción; la

resolución [40] hace un análisis de los criterios de ahorro propuestos en función de: disponibilidad, tecnología, porcentaje de ahorro y retorno de la inversión adicional. Sin embargo, el reporte de la implementación de las medidas para estos ahorros de energía, no evidencian un aporte significativo para un tipo de vivienda particular con un retorno de la inversión extra en un tiempo menor a los 10 años, esto puede hacer que los incentivos en este sector cobren relevancia particular debido al uso final de esa energía.

Los criterios analizados en este artículo, sin duda corresponden a los que tienen mayor incidencia en el ahorro de energía y en la salud de los ocupantes y de la edificación. Con lo cual deben ser puntos de partida prioritarios para el establecimiento de un modelo de medición de eficiencia energética en Colombia. Establecer valores para el clima tropical incide de forma directa en la selección de materiales, aislantes y tecnologías para ser utilizadas en la construcción, lo que puede impulsar procesos I+D en nuevos materiales de bajo costo y producción local que, amerita no solo una inversión económica, sino una visión de los diseños, que deben pasar por un análisis de disponibilidad y operación local de los mismos. Este proceso sin duda, establece una transferencia tecnológica que puede estar soportada entre otros por el acuerdo vinculante de París 2015, tomando en cuenta que el clima tropical está presente en más de un 30% de la superficie poblada del planeta.

Es por esta razón que la implementación de: subvenciones, contribuciones financieras, apoyos logísticos, reducciones tributarias, exenciones, bonificaciones, concesiones, premios o reconocimientos, créditos y apoyo con materiales entre otros cobran especial relevancia, que deben ser ofrecidas a nivel municipal, regional y nacional, de manera que el compromiso adquirido a través de los NDC (Contribución Nacionalmente Determinada) por Colombia en el marco del Acuerdo de París 2015, sea compartido, y factible de ser logrado, contribuyendo además a disminuir la pobreza energética, mejorando la calidad de vida de los ciudadanos.

Además, a estas normas y leyes se encuentra la Hoja de Ruta Nacional de Edificaciones Neto Cero Carbono [40] en Colombia, la cual marca

estrategias muy completas para cumplir las metas adquiridas en la NDC, pero que se trata de recomendaciones. Para lograr el objetivo establecido de cero carbonos, se debe involucrar principalmente entidades gubernamentales como Ministerio de la vivienda, Ministerio de energía y Ministerio de Ciencia Innovación y Tecnología, además del sector privado, enmarcado en un gran compromiso que abarca a todos los actores que desempeñan un papel dentro de la industria de la construcción. Esto implica la actualización y la elaboración de acciones específicas a corto, mediano y largo plazo, alineados con las metas definidas en esta hoja de ruta bajo instrumentos cuyo carácter debe ser más impositivo.

CONCLUSIONES

Este trabajo presenta un análisis comparativo teórico de las normativas LEED, Passivhaus y el código técnico de la edificación (CTE) aplicados al contexto colombiano y sus condiciones climáticas tropicales. Los resultados destacan la viabilidad de estrategias como el diseño eficiente de envolventes térmicas, la hermeticidad y la incorporación de energías renovables para mejorar la eficiencia energética en edificaciones tropicales. La eficiencia energética, no depende exclusivamente del equipamiento y diseño; trasciende estos aspectos al optimizar el consumo energético, mejorar la salud de los ocupantes y reducir costos mediante la integración de conceptos como la economía circular.

Se puede visualizar que las estrategias analizadas para lograr un confort adecuado, coinciden en los tres sistemas estudiados, *Passivhaus*, LEED y CTE asociadas directamente a la zona climática, cuyos niveles de exigencias están en función de esta condición. El diseño de la envolvente a través de los valores de transmitancia es la forma más segura de garantizar un aislamiento térmico, controlando las ganancias de calor a través de los huecos y cristales. Complementando el proceso de confort a través de la hermeticidad o estanqueidad asegurando las renovaciones de aire dentro de cada espacio, cuidando el consumo o la eficiencia de los equipos contemplados para este fin.

El Código Técnico de la Edificación (CTE), es una norma de obligatorio cumplimiento, considera un enfoque más flexible en sus requisitos, garantizando

que las viviendas puedan alcanzar los objetivos establecidos sin necesidad de aspirar a un sello o un grado de certificación, esto hace que la vivienda pueda ser más accesible. Esto contrasta con estándares voluntarios como el LEED y *Passivhaus*, los cuales, además de garantizar niveles de eficiencia energética, tienen un componente de reconocimiento y etiquetas que influye directamente en el valor comercial de los inmuebles. Esta dualidad resalta la necesidad de equilibrar las normativas nacionales con la accesibilidad y practicidad, promoviendo una sostenibilidad alcanzable para todos los sectores sociales sin desmotivar la adopción de prácticas eficientes.

En el caso de las normas colombianas, es fundamental establecer límites claros en los niveles de eficiencia energética de los equipos de climatización, lo que impulsa el uso de equipamiento sostenible. La transición hacia edificaciones energéticamente eficientes requiere normativas claras, es fundamental establecer mecanismos de ayudas accesibles y diversificadas, como subvenciones, incentivos financieros, reducciones tributarias, bonificaciones, exenciones, créditos blandos, provisión de materiales y apoyos logísticos, entre otros. El resultado del análisis tiene aplicaciones prácticas en el diseño, renovación y operación de edificaciones bajo condiciones tropicales, identificando bases para normativas más robustas y adaptadas al contexto colombiano. A futuro, la implementación de herramientas regulatorias, apoyadas por compromisos internacionales como el Acuerdo de París, facilitará la transición hacia edificaciones sostenibles, fomentando la inclusión social y el cumplimiento de los objetivos climáticos.

Finalmente, en el contexto colombiano las estrategias energéticas en la edificación residencial requieren más articulación técnica y financiera, sustentada en un fortalecimiento del marco legal, si bien la resolución 0549 de 2015 y la Hoja de Ruta Nacional de Edificaciones Neto Cero Carbono incluyen criterios importantes, deben actualizarse y dejar de ser documentos voluntarios para consolidar una política energética coherente hacia la regulación urbana y ambiental. Este enfoque integral asegura que las estrategias planteadas sean efectivas y replicables, contribuyendo a construcciones más eficiente y resiliente frente al cambio climático.

REFERENCIAS

- [1] J. Hirvonen *et al.*, “Emissions and power demand in optimal energy retrofit scenarios of the Finnish building stock by 2050,” *Sustainable Cities and Society*, vol. 70, Art. no. 102896, 2021, doi: 10.1016/j.scs.2021.102896.
- [2] AIE, “Tracking clean energy progress 2023,” *iea.org*. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/tracking-clean-energy-progress-2023>
- [3] IEA, “World energy outlook 2022,” *iea.org*. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>
- [4] *2021 International Building Code Spanish edition (IBC)*, International Code Council. [Online]. Available: <https://codes.iccsafe.org/content/IBCSP2021P1/prefacio#:~:text=URL%3A%20https%3A%2F%2Fcodes,100>
- [5] F. Johari, J. Munkhammar, F. Shadram, and J. Widén, “Evaluation of simplified building energy models for urban-scale energy analysis of buildings,” *Building and Environment*, vol. 211, Art. no. 108684, 2022, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.108684.
- [6] A. Meier, J. Wright, and A.H. Rosenfeld, *Supplying Energy Through Greater Efficiency: the Potential for Conservation in California's Residential Sector*, California, USA: University of California Press, 2022.
- [7] *Ergonomía del ambiente térmico*. Determinación analítica e interpretación del confort térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios locales de confort térmico, UNE-EN ISO 7730: 2006, Asociación Española de Normalización y Certificación, 2006.
- [8] M. Krarti, M. Aldubyan, and E. Williams, “Residential building stock model for evaluating energy retrofit programs in Saudi Arabia,” *Energy*, vol. 195, Art. no. 116980, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.116980.
- [9] Consejo de las Comunidades Europeas, “Directiva 93/76/CEE, de 13 de septiembre de 1993, relativa a la limitación de las emisiones de determinados contaminantes a la atmósfera por las grandes instalaciones de combustión”, Diario Oficial de las Comunidades Europeas, L237, 1993. [En línea]. Disponible: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:31993L0076>
- [10] Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, “Directiva 2002/91/CE, de 16 de diciembre de 2002, relativa al rendimiento energético de los edificios”, Diario Oficial de las Comunidades Europeas, 2003. [En línea]. Disponible: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32002L0091>
- [11] Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, “Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de mayo de 2010, relativa a la eficiencia energética de los edificios (refundición)”, Diario Oficial de la Unión Europea, L 153, 2010. [En línea]. Disponible: <http://data.europa.eu/eli/dir/2010/31/oj>
- [12] Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, “Directiva (UE) 2023/231 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 13 de septiembre de 2023”, Diario Oficial de la Unión Europea, L231, 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.boe.es/doue/2023/231/L00001-00111.pdf>
- [13] Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, “Corrección de errores de la Directiva (UE) 2018/2001, de 11 de diciembre de 2018, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables”, Diario Oficial de la Unión Europea, L328, 2018. [En línea]. Disponible: <https://www.boe.es/doue/2018/328/L00210-00230.pdf>
- [14] Building Research Establishment, “BREEAM UK new construction,” Breeam, UK, Technical manual SD5078, 2018.
- [15] *Reglamento Minergie Latam*, v2024_1, Minergie, 2024. [En línea]. Disponible: https://www.minergie.com/media/reglamento_minergie_latam_v2024_1_es.pdf
- [16] *Forskrift om endring i forskrift om energimerking av bygninger og energivurdering av tekniske anlegg (energimerkeforskriften for bygninger)*, Norsk Lovtidend, nr. 356, Energidepartementet, Norge, 2024.
- [17] Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB). Bauen für eine bessere Welt: Wie Gebäude zu den globalen Nachhaltigkeitszielen der Vereinten Nationen beitragen. Report Dezember, 2020. [Online]. Available: <https://www.dgnb.de/de/dgnb-richtig-nutzen/publikationen-und-downloads>

- [18] *Eficiencia energética en edificaciones: Envoltante de edificios para uso habitacional*, NOM-020-ENER-2011, Secretaría de Energía, Diario Oficial de la Federación, México, 2011. [En línea]. Disponible: <https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4459/sener1.htm>
- [19] A. Amiri, J. Ottelin, and J. Sorvari, "Are LEED-Certified buildings energy-efficient in practice?," *Sustainability*, vol. 11, no. 6, Art. no. 1672, 2019, doi: 10.3390/su11061672.
- [20] M. Borrallo-Jiménez, M. Lopez De Asiain, P. M. Esquivias, and David Delgado-Trujillo, "Comparative study between the passive house standard in warm climates and nearly zero energy buildings under spanish technical building code in a dwelling design in Seville, Spain," *Energy and Buildings*, vol. 254, Art. no. 111570, 2022, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111570.
- [21] F.F. Prieto García, "Estudio del estándar Passivhaus, aplicación y comparativa con el CTE", Tesis de Master, Escuela Técnica Superior, Universidad de Alicante, San Vicente del Raspeig, España, 2017. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/10045/69349>
- [22] R. Peris Machi, "Arquitectura pasiva. De la vivienda actual al estandar Passivhaus", Proyecto Final de Grado, Universitat Jaume I, Castellón de la Plana, España 2023. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/10234/204781>
- [23] J. Mun, J. Lee, and M. Kim, "Estimation of Infiltration Rate (ACH Natural) Using Blower Door Test and Simulation," *Energies*, vol. 14, no. 4, Art. no. 912, 2021, doi: 10.3390/en14040912.
- [24] M.J. Berenguer Subils y F. Bernal Domínguez, "El dióxido de carbono en la evaluación de la calidad del aire interior", Ministerio de Trabajo y Economía Social, Madrid, España, NTP 549, 2000. [En línea]. Disponible: https://www.insst.es/documents/94886/327064/ntp_549.pdf/e9364a82-6f1b-4590-90e0-1d08b22e1074
- [25] S. Guillén-Lambea, B. Rodríguez-Soria, and J. Marín, "Review of European ventilation strategies to meet the cooling and heating demands of nearly zero energy buildings (nZEB)/Passivhaus. Comparison with the USA," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 62, pp. 561-574, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.05.021.
- [26] *Ventilación para Edificios no Residenciales. Requisitos de Prestaciones para los Sistemas de Ventilación y Climatización*, UNE-EN 13779:2005, Comité Europeo de Normalización CEN, Madrid, España, 2005.
- [27] T. Yakimchuk, P. Linhares, and V. Hermo, "Evaluation of a modular construction system in accordance with the Passivhaus standard for components," *Journal of Building Engineering*, vol. 76, Art. no. 107234, 2023, doi: 10.1016/j.jobte.2023.107234.
- [28] U.S. Green Building Council, "LEED v5 Building Design and Construction (BD+C): New Construction - Public Comment 2," U.S. Green Building Council, Washington, DC, USA, Sep. 2024. [Online]. Available: <https://www.usgbc.org/sites/default/files/2024-09/LEED-v5-BDC-New-Construction-Public-Comment-2-clean.pdf>
- [29] *Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings*, ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2019, ASHRAE, Atlanta, GA, USA, 2019.
- [30] Ideam "Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales", ideam.gov.co. [En línea]. Disponible: <https://www.ideam.gov.co/>
- [31] United for Efficiency (U4E), "Guía de reglamentación modelo para acondicionadores de aire y bombas de calor aire-aire energéticamente eficientes y climáticamente amigables", Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), 2021. [En línea]. Disponible: https://united4efficiency.org/wp-content/uploads/2021/11/U4E_AC_Model-Regulation_ES_2021-11-08.pdf
- [32] *Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings*, ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2019 Addendum t, Atlanta, GA, USA, Jul. 2022. [Online]. Available: https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/standards%20and%20guidelines/standards%20addenda/90_1_2019_t_20220812.pdf
- [33] Ministerio de Vivienda y Agenda Urbana, "El CTE en el BOE", codigotecnico.org. [En línea]. Disponible: <https://www.codigotecnico.org/QueEsCTE/EICTEenElBOE.html>
- [34] Ministerio de Vivienda y Agenda Urbana, Gobierno de España, Real Decreto 450. (14

- de junio de 2022). Boletín Oficial del Estado, no. 142, Código Técnico de la Edificación (CTE), Documento Básico HE Ahorro de Energía. [En línea]. Disponible: <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HE/DBHE.pdf>
- [35] WeatherSpark, “El clima y el tiempo promedio en todo el año en Colombia”, [weatherspark.com](https://es.weatherspark.com/y/23310/Clima-promedio-en-Colombia-durante-todo-la%C3%B1o). [En línea]. Disponible: <https://es.weatherspark.com/y/23310/Clima-promedio-en-Colombia-durante-todo-la%C3%B1o>
- [36] Ministerio de Vivienda y Agenda Urbana, Gobierno de España, Real Decreto 450. (14 de junio de 2022). Boletín Oficial del Estado, no. 142, Código Técnico de la Edificación (CTE), Documento Básico HS Salubridad. [En línea]. Disponible: <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HS/DBHS.pdf>
- [37] Ministerio de la Presidencia, Justicia y Relaciones con las Cortes, Gobierno de España, Real Decreto 1027. (20 de julio de 2007). Boletín Oficial del Estado, no. 207, Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios. [En línea]. Disponible: <https://www.boe.es/eli/es/rd/2007/07/20/1027/con>
- [38] Ministerio de Minas y Energía de Colombia, Diario Oficial No. 49.645. (24 de septiembre de 2015). Resolución 41012, Reglamento Técnico de Etiquetado (RETIQ). [En línea]. Disponible en: https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_minminas_41012_2015.htm
- [39] Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia. Decreto 1077. (10 de julio de 2015). Resolución 549, Guía para el Ahorro de Agua y Energía en Edificaciones. Disponible: <https://camacol.co/sites/default/files/Resoluci%C3%B3n%20549%20de%202015%20con%20Anexos.pdf>
- [40] Consejo Colombiano de Construcción Sostenible, “Hoja de ruta nacional de edificaciones neto cero carbono”, Bogotá, Colombia, 2022. [En línea]. Disponible: https://www.cccs.org.co/wp-content/uploads/2023/03/Hoja_de_Ruta_ENCC_compressed.pdf