

Zero Energy Balance Buildings: Definitions, Current Challenges and Future Opportunities

S. Osorio , J. D. Marín and S. X. Carvajal

Abstract— This article reviews the definitions related to buildings that promote zero energy balance. Besides, this article identifies the main challenges for the dissemination of and overcrowding of these sustainable buildings, which are called Zero Energy Buildings -ZEB. The analyzed literature shows that the main challenges are to include technical, economic, social, and environmental aspects of each territory in the scenarios and proposed incentives since the roadmaps adopted by the countries will depend on their industrial development. In emerging countries, the roadmap development process should be needs-based, not solution-based. This article proposes, as opportunities to disseminate and spread the ZEB in the territories, to contemplate a type of regulatory scenarios that promote the development of passive designs that promote the construction of new buildings based on promoting the use of bioclimatic and advances in new materials that improve comfort according to the needs of each region. On the other hand, the design of direct and indirect incentives focused on research and innovation of own developments related to active designs for the renovation of existing buildings is proposed.

Index terms — Definitions, Energy efficiency, Zero Energy Campus – ZEC, Zero Energy Communities, Zero Energy Building – ZEB.

I. INTRODUCCIÓN.

Actualmente, la sociedad enfrenta necesidades energéticas generadas por el creciente consumo de electricidad a nivel global que contribuye a acelerar los efectos negativos asociados al cambio climático [1]. Particularmente, el aumento de la demanda eléctrica en los edificios, se debe al crecimiento de la población y al incremento del consumo per cápita causado por el desarrollo tecnológico [2]. Los edificios existentes son responsables del 36% del consumo total de energía en todo el mundo [3], [4] y del 39% de emisiones de CO₂ en toda Europa [5]–[7]. En el sector de la construcción, se espera que para el año 2050, las emisiones de CO₂ lleguen a un 50%[8], [9].

Por lo anterior, se genera una motivación global de proponer políticas energéticas que promuevan la construcción de edificios con consumos racionales, que incluyan sistemas de generación distribuida, sistemas de gestión e innovaciones que permitan la aplicación de balances energéticos cero [10].

El término edificaciones de balance energético cero (ZEB- por sus siglas en inglés) nace desde el año 2000 en la normativa de la Unión Europea - UE el cual significa, de manera general, edificios donde prevalece el uso racional y eficiente de la energía y la oportunidad de instalar Generación Distribuida -GD *in situ*, con el fin de autoabastecer necesidades energéticas de las edificaciones desde una mirada holística (energética,

ambiental y económica) [11], [12]. Actualmente, en tiempos de pandemia surgen nuevas necesidades y comportamientos sociales. Por un lado, se presenta un aumento en la demanda del consumo de energía en edificios residenciales y por otro lado se genera la necesidad de crear unas relaciones equilibradas con la naturaleza desde todos los sectores energéticos [13].

En este artículo se presenta una perspectiva general de las definiciones actuales, desafíos para la masificación y futuras oportunidades relacionadas con la difusión mundial de las construcciones ZEB. El artículo está compuesto de las siguientes secciones: la Sección 2 incluye definiciones de edificaciones ZEB según diferentes latitudes; la Sección 3 ilustra sobre los desafíos identificados para la difusión e implementación a gran escala de los ZEB ; la Sección 4 presenta las oportunidades futuras y una propuesta de reconocer y promocionar las innovaciones locales para conseguir la masificación de las ZEB en cada territorio, como por ejemplo de Zero Energy Campus - ZEC; y finalmente, la Sección 5 concluye y resalta los aspectos más relevantes de la revisión.

II. DEFINICIONES DE EDIFICACIONES ZEB

A nivel internacional se destacan trabajos y diseños referentes a las edificaciones sustentables y ZEB, entre los países con mayor grado de difusión de este tipo de edificaciones se encuentra China, Japón, Corea del Sur, Canadá, Estados Unidos y algunos países pertenecientes a la UE [11], [14], [15].

A pesar de esto, no existe un enfoque universalmente reconocido, por lo que cada país debe desarrollar localmente la definición de ZEB de acuerdo a contextos reales y únicos de cada zona [15]. Esta ausencia de definición o falta de uniformidad en el concepto de ZEB afecta el diseño de un perfil característico de un edificio sustentable y eficiente para la comunidad a nivel global, llevando consigo dificultades para comparar diferentes soluciones provenientes de distintos orígenes [8].

Para alcanzar ahorros en cuanto a consumo energético en las edificaciones se deben considerar medidas de rendimiento energético por medio de diseños pasivos, activos y la cooperación activa de los usuarios para lograr cero emisiones de carbono y cero consumo de energía en todo el ciclo de vida [15].

Los diseños pasivos están ligados a diseños arquitectónicos donde prevalece el uso de la bioclimática para asegurar el confort deseado, sin necesidad de equipos eléctricos que ocasionan consumos de energía eléctrica y aumentan la huella de carbono. Los diseños activos implican refinar la calefacción,

S. Osorio, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia, saosorioru@unal.edu.co.

J. D. Marín, Gerente de GAMACO, gerencia@grupogamaco.com.

S. X. Carvajal, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia, sxcarvajalq@unal.edu.com.

ventilación, sistemas HVAC (*heating, ventilation and air conditioning*, por sus siglas en inglés), iluminación y cualquier otra aplicación de servicios de construcción [16]. Generalmente, las estrategias pasivas tienen un costo de inversión de capital adicional bajo en comparación con el beneficio potencial en ahorro de energía [4], [17]. Por tanto, el diseño pasivo es recomendado en muchas pautas de diseño ecológico y sostenible [18].

En [10], [11], [19] se evidencia que la norma técnica estándar nacional para la construcción de edificios de energía casi cero en China es citada por investigaciones asiáticas y va de la mano con normativas europeas y norteamericanas. A continuación, se describen las cuatro clasificaciones presentadas para ZEB comúnmente vistas a nivel internacional, pero con la característica de ser edificaciones que están conectadas a la red eléctrica local, estas son: edificios de energía ultra baja (LEB), edificios de energía casi nula (nZEB), edificios de energía neta cero (NZEB) y edificios de energía positiva (PEB) por sus siglas en inglés.

A. Edificios de Consumo de Energía Ultra Baja LEB.

En esta categoría se encuentran las edificaciones que presentan una reducción energética de 50% con respecto a un edificio convencional [11].

Para que un edificio esté en la categoría LEB, deberá adaptarse a las condiciones climáticas y reducir la demanda de energía desde el diseño arquitectónico por medio de técnicas pasivas, mejorar la eficiencia energética desde los sistemas de construcción [15], proporcionar confort en el ambiente interior de la edificación con una disminución del consumo energético del mismo [11] y aumentar así la eficiencia energética de las mismas por medio de normas e incentivos sobre construcción sostenible [20].

B. Edificios de Consumo de Energía Casi Nula nZEB.

En esta categoría se encuentran las edificaciones que presentan una reducción energética de 60% a un 75% con respecto a un edificio convencional [11]. Adicional a la implementación de las estrategias de diseños pasivos expuesta en la anterior categoría, los edificios catalogados en la nZEB, utilizan fuentes de generación renovable y proporcionan confort en el ambiente interior de la edificación con un consumo de energía extremadamente bajo [11]. Basado en la Directiva de Eficiencia Energética de Edificios de la UE (EPBD por sus siglas en inglés), un edificio nZEB debería tener un rendimiento energético extremadamente alto y un consumo de energía cero o muy bajo de fuentes de energía renovables *in situ* o en lugares cercanos [7]. Para la EPBD algunos desafíos de la masificación los diseños y construcciones de edificios nZEB son: i. evidenciar la reducción de dióxido de carbono; ii. tarificación horaria que incentive la reducción de consumos sin perder el confort; iii. encontrar el equilibrio entre la eficiencia energética y la generación de energía renovable [15], [21].

Los nZEB son de las edificaciones con mayor presencia y popularidad para la renovación de edificaciones existentes y diseño de nuevas edificaciones en los países con mayores aspiraciones de reducción energética [22].

C. Edificios de Cero Consumos de Energía (NZEB por sus Siglas en Inglés)

En esta categoría se encuentran las edificaciones que presentan una reducción energética de 100% con respecto a un edificio convencional. [11].

Un edificio es NZEB, si cumple con la categoría nZEB y además es capaz de suplir sus necesidades energéticas en un tiempo determinado a partir de sistemas de generación distribuida proveniente de fuentes renovables, sistemas de almacenamiento de energía, sistemas de medición y control a partir de aplicaciones de internet de las cosas - IoT (por sus siglas en inglés) [11], [19].

Generalmente, se presenta la aplicación de construcciones que usan un arreglo de baterías que permite almacenar la energía que se genera por medio de las fuentes de generación distribuida renovables para que pueda ser consumida en las noches, picos energéticos, consumos derivados de movilidad eléctrica o proporcionar electricidad en situaciones de desconexión de la red eléctrica local, entre otros [23]. Además, un edificio NZEB que cuente con aplicaciones IoT debe tener una red de comunicaciones que conecte dispositivos inteligentes como sensores, actuadores y medidores inteligentes bidireccionales.

Adicionalmente, se utilizan aplicaciones móviles que permiten administrar los parámetros climáticos y de confort de la estructura, para reducir la energía consumida por la edificaciones, enfocándose en consumir la energía renovable producida *in situ* o en lugares cercanos [24]. El balance energético de la energía producida *in situ* y la energía consumida de la red eléctrica local debe de compararse en un periodo establecido que evidencie el balance cero o muy cercano a cero en un tiempo determinado [11], es decir, si se define un año como intervalo de tiempo en donde se medirá el desempeño energético del NZEB, este deberá resultar cero entre lo que la edificación consumió de la red eléctrica local y lo que la edificación genera, ya sea exportando a la red o en labores de autoconsumo.

D. Edificios de Energía Positiva PEB.

En esta categoría se encuentran las edificaciones que además de suplir su demanda energética, tienen la infraestructura de medición bidireccional para exportar excedentes a la red eléctrica a lo largo de un tiempo determinado (mes/año) [15]. Un PEB es un edificio NZEB que genera, por medio de fuentes renovables, más energía eléctrica de lo que consume el edificio [11]. Estos edificios son el resultado de la utilización de diseños pasivos y activos, tecnologías innovadoras de eficiencia energética, sistemas de confort interior en un máximo nivel e incentivos para la participación en el mercado energético local [10].

Los edificios NZEB o incluso PEB se están convirtiendo en una prioridad para los investigadores multidisciplinarios relacionados con la física y la ingeniería de los edificios [10]. Además, un NZEB/PEB puede ser considerado como un edificio neto de energía cero o negativa durante un año típico [19], [25], donde el edificio exportará energía a la red cuando haya un exceso de generación de energía, pero también puede utilizarse dicha energía excedente para otros usos [26]. Este flujo bidireccional debería dar como resultado una exportación neta positiva o cero de energía desde el edificio a la red [10],

donde sea posible contribuir a la red para alcanzar zonas energéticamente eficientes [26].

Esta clasificación es un insumo primario para generar políticas e incentivos y es aplicado por los países miembros de la UE.

A partir de dicha clasificación, Noruega [27], Reino Unido [28] y Australia [29] precisan incentivos que promuevan la reducciones de emisiones de gases de efecto invernadero en sus políticas o definiciones de ZEB y las aplican en proyectos de edificaciones renovadas y nuevas.

Existen otras terminologías de ZEB producto del desarrollo de la investigación ya sea por parte de expertos en edificaciones sustentables o por la academia, las cuales se caracterizan por incluir en sus definiciones el uso de recursos energéticos distribuidos [30]–[34], dispositivos de almacenamiento [35], equipos de medición avanzada que cuentan con medida bidireccional con el fin de participar en programas de respuesta de la demanda [31], [32], [36] y sistemas de acreditación basados en emisiones de gases nocivos para la calidad del medioambiente [30], [31], [36].

Además de las anteriores definiciones, se puede hablar de un conjunto de edificaciones que formen comunidades ZEB, como por ejemplo Zero Energy Campus - ZEC en instituciones universitarias y Zero Energy Community en conjuntos residenciales [4], [15], [37]. Como resultado, la terminología de "energía cero" ha sido criticada por ser ambigua e inconsistente, en comparación con las diferencias en los métodos de cálculo, lo que se refleja con mayor evidencia en el aspecto de la generación de energía [15], [38].

En la Tabla I se muestra las políticas, organizaciones, programas o leyes que tiene cada país o región referentes a ZEB, así como sus finalidades u objetivos, los cuales representan un primer paso para la inclusión de ZEB.

TABLA I
ALGUNOS PROGRAMAS Y POLÍTICAS EN EL MUNDO REFERENTES A ZEB

Región	Política/programas/	Finalidades	Ref.
UE	EPBD	<ul style="list-style-type: none"> • Edificios nuevos nZEB después de 2020. • Edificios públicos nZEB después de 2018. • Renovaciones de edificios existentes estatales de al menos 3% del total. • Descarbonización en la construcción para 2050, con hitos para 2030, 2040 y 2050. 	[15], [11], [7],[21], [39][40]
UE	Estrategia de Construcción de Energía Casi Cero 2020 (ZEBRA 2020)	<ul style="list-style-type: none"> • Edificios nZEB/NZEB. • Impulsar desarrollo comercial de los nZEB y adopción en los mercados nacionales. 	[4], [41].
UE	Séptimo Programa de Acción Ambiental (PEA)	<ul style="list-style-type: none"> • Convertir a la Unión Europea en una economía baja en carbono y hacer que 	[7],[42].

EE. UU.	Orden Ejecutiva 13514	<ul style="list-style-type: none"> • Edificios nuevos NZEB para 2030. 	[15][43]
EE. UU.	Ley de Independencia y Seguridad Energética de 2007.	<ul style="list-style-type: none"> • Todos los edificios comerciales NZEB para 2030 	[15], [44]
EE. UU.	Programa de Tecnología de la Construcción del Departamento de Energía de los EE. UU.	<ul style="list-style-type: none"> • Viviendas comercializables NZEB para 2020. • Edificios públicos NZEB a bajo costo incremental para 2025. 	[11].
Canadá	Natural Resources Canadá - estándar R-2000.	<ul style="list-style-type: none"> • Certificación R-2000 para viviendas para viviendas 50% más eficientes energéticamente. 	[15], [45], [46].
Canadá	Natural Resources Canada - Advanced House Program y la Net-Zero Energy Home Coalition.	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollar viviendas de bajo consumo energético en todo Canadá utilizando diversas tecnologías disponibles. 	[47], [48].
China	Ministerio de Vivienda y Desarrollo Urbano-Rural (MOHURD) - la Orientación técnica sobre construcción ecológica pasiva y de baja energía (Edificio residencial)	<ul style="list-style-type: none"> • Mejorar la eficiencia energética de los edificios en China. • Crear definición de El edificio verde pasivo de energía ultra baja. 	[15], [49].
Japón	Políticas energéticas para la inclusión de ZEB 2014.	<ul style="list-style-type: none"> • Edificios públicos nuevos nZEB para 2020. • Casas residenciales y demás edificios nuevos NZEB para 2030. • Incentivos económicos para promover edificios ecológicos y edificios residenciales de bajo consumo energético. 	[11], [15], [50]–[53].
Corea del sur	Plan de Activación para Edificios Verdes 2009 y Plan de acción para la construcción de energía cero para el cambio climático 2014.	<ul style="list-style-type: none"> • Edificios nuevos ZEB para 2025. • Generación de políticas e incentivos para lograr ZEBs de alto nivel. 	[11], [15], [54].

De la Tabla I se resalta la inclusión de políticas de incentivos para la renovación de edificios existentes como es el caso de UE, EE.UU. y Canadá. Dichas políticas permiten generar créditos condonables y apoyar la instalación de analizadores de redes con el fin de que se utilice la información para determinar la línea base de consumos y la proyección de reducción de

consumos a partir del monitoreo de variables climáticas y eléctricas.

Además de los programas descritos en la tabla I también se destaca a nivel europeo el proyecto ENTRANZE, el cual fue una iniciativa que hasta el año 2014 proporcionó datos, análisis y directrices para la consecución de nZEB dentro de los edificios existentes [55].

Con respecto a incentivos entorno a la planeación de construcciones sustentables, los países líderes son Japón, Corea del Sur y China. Estos países asiáticos exigen nuevas técnicas de diseño arquitectónico a partir del desarrollo de la bioclimática y el desarrollo de materiales con funciones adicionales, como son techos y ventanas, que a su vez son paneles solares. También se presenta la creación de diseños ecológicos que incluyen en sus cálculos condiciones locales como son el umbral mínimo de eficiencia energética, balance de calentamiento-enfriamiento, límites de confort térmico, eficiencia vs umbral de energías renovables y calidad de construcción.

Adicionalmente, se encuentra que el avance en la implementación de incentivos para promover los edificios ZEB en la UE no es homogéneo, ya que Francia, Italia y Reino Unido cuentan con planes de desarrollo nacionales que promueven los edificios ZEB tanto nuevos como existentes, mientras que Bulgaria, Eslovenia, España, Grecia y Hungría no cuentan con dichos planes [56] y por ende, la implementación de este tipo de edificaciones es casi nula en sus territorios. De acuerdo con lo anterior, se evidencia el desafío de crear marcos regulatorios en cada país para que se difunda efectivamente las edificaciones que promuevan las ZEB. La creación de marcos regulatorios pertinentes es un desafío para cada país debido a que organizaciones que tienen funciones de analizar la incidencia de políticas públicas como CEPAL [57], WEC [58] e IEA [59], [60] resaltan y concuerdan en que el éxito de una política de incentivos y obligaciones se fundamenta en que cada territorio es diferente y por ello la creación debe concebirse a partir de la inclusión de características técnicas, económicas, sociales y ambientales propias. En la siguiente sección se amplía este concepto incluyente y sistémico referente a los

desafíos frente a políticas públicas, específicamente en torno a la inclusión de edificios ZEB.

A nivel latinoamericano no se encuentran muchas políticas, iniciativas o programas referentes a ZEB o edificaciones sustentables. Sin embargo, Existen algunas de estas en Chile, Colombia, Brasil y a nivel global que pueden alentar las ZEB. Estas se mencionan en la tabla II.

TABLA II
ALGUNOS PROGRAMAS Y POLÍTICAS EN LATINOAMÉRICA REFERENTES A ZEB

Región, Ref.	Política/programa mas/ iniciativa	Finalidades
Chile, [61], [62].	Cumplimiento estándares eficiencia energética OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos).	<ul style="list-style-type: none"> Todos los edificios nuevos deberán cumplir con estándares de eficiencia energética para viviendas, con metas para 2035 (viviendas de energía casi nula) y 2050. Creación del TDRé (Norma Chilena de Referencia para el Confort Térmico y la Eficiencia Energética en Edificios) Creación del sistema de certificación de Edificios Sustentables (CES)
Colombia [63].	Guía de construcción sostenible para el ahorro de agua y energía. Resolución 540 de 2015. PROCEL EDIFICA (Programa Nacional de Conservación de Energía Eléctrica en Edificios)	<ul style="list-style-type: none"> Dicta medidas de diseño activo y pasivo para lograr reducciones en el consumo de energía eléctrica y agua para diferentes tipos de edificaciones en diferentes tipos de clima.
Brasil, [64].	PROCEL EDIFICA (Programa Nacional de Conservación de Energía Eléctrica en Edificios)	<ul style="list-style-type: none"> Es un subprograma de PROCCEL con la misión de promover la eficiencia energética en los edificios brasileños. Consiste en la atribución de una etiqueta, según la eficiencia energética de los edificios.
LATAM, [64].	GBC (Green Building Council)	<ul style="list-style-type: none"> Está presente en 80 países, trabaja por la transformación de la industria de la construcción hacia la sostenibilidad. Brindan la certificación LEED (Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental).

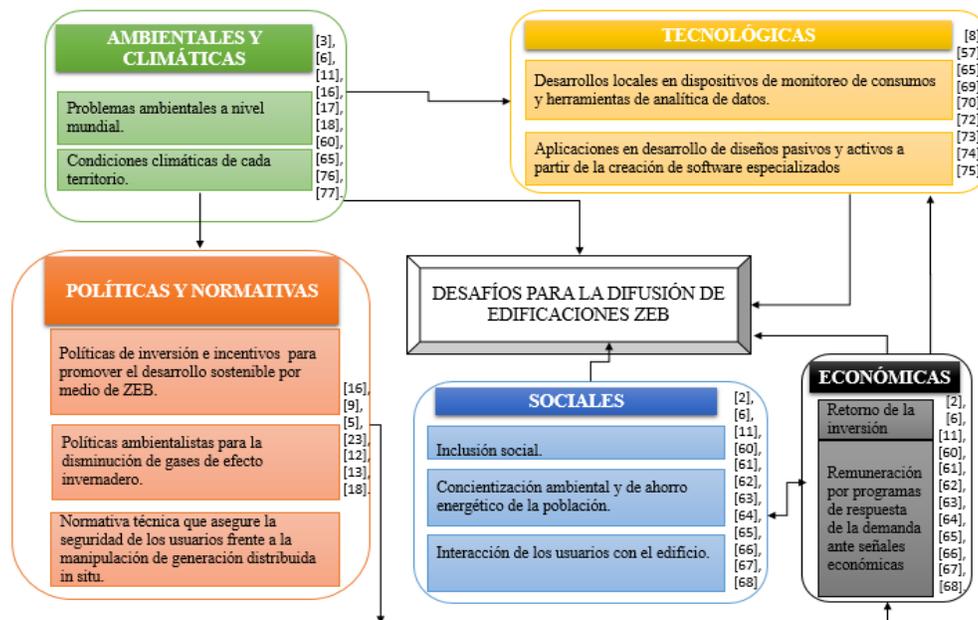


Fig 1. Principales desafíos para el desarrollo de ZEB. Elaboración propia.

III. DESAFÍOS PARA LA AUMENTAR LA DIFUSIÓN DE ZEB

Se propone afrontar el problema de las definiciones de ZEB desde un punto de vista continuo y sistemático [65]. Dicho problema debe ser analizado por medio de una mirada holística que integre componentes de naturaleza política, tecnológica y económica con el territorio y las necesidades y comportamientos de los usuarios finales [66], [67]. En la Fig. 1, se describe cada desafío identificado para el desarrollo de ZEB y se explica interrelación entre ellos.

A. Desafíos Ambientales y Climáticos

El mundo enfrenta problemas ambientales ligados al desarrollo creciente de la sociedad humana, problemas que preocupan cada vez más a los gobiernos, la industria y la academia [68]. En relación con los edificios, a nivel global han generado entre el 30% y 40% de consumo final de energía en el mundo y han emitido el 40% de emisiones de CO₂. Por ello la energía relacionada con los edificios desempeñara un papel clave para contrarrestar el cambio climático por medio del desarrollo sostenible [8]. Por lo anterior, el cambio climático genera unos desafíos políticos en la sociedad para generar normas y regulaciones que mitiguen los efectos negativos del calentamiento global y las emisiones de CO₂.

El clima representa un papel importante en los sistemas de eficiencia energética y en los patrones de consumo de energía, y debe ser monitoreada localmente ya que las condiciones climáticas varían dentro de los países. Por ello para la implementación de ZEB, se generan consecuencias como la complejidad de una optimización simultánea del consumo de energía para calefacción y refrigeración, agua caliente sanitaria ACS, iluminación y la maximización de la producción de energía eléctrica y térmica ya que es diferente en relación con el contexto geográfico [8].

La variación climática en algunos países es un desafío ya que se necesitan requisitos de desempeños climáticos flexibles y regionales para ZEB. Para las definiciones ZEB, los parámetros descriptivos deben identificarse y sus valores objetivo obligatorios deben ajustarse a los climas individuales. Por ejemplo la envolvente térmica del edificio se debe desarrollar con el objetivo de reducir las pérdidas de energía en invierno y limitar el sobrecalentamiento en verano [8]. En climas fríos, el diseño de envoltura con un rendimiento térmico muy alto, tanto para elementos opacos como transparentes, es una condición esencial para cumplir con los requisitos de ZEB. En climas cálidos, en cambio, el papel aislante de la envoltura depende de las condiciones micro climáticas, es recomendable un nivel de aislamiento nulo o bajo cuando las pérdidas térmicas entre el día y la noche son relevantes, explotando el efecto de enfriamiento libre en climas templados. También el control de la radiación solar a través de componentes transparentes permite la explotación óptima del efecto de las ganancias libres y garantiza un buen nivel de condiciones de confort interno, con una maximización en invierno y una minimización en verano [8].

Por otra parte, el papel de las fuentes de energía renovable en los edificios da respuesta a la necesidad de disminuir consumos que permitan aplazar el uso de más generación contaminante [69]. Particularmente, las tecnologías solares son más adecuadas en regiones soleadas, pero los paneles

fotovoltaicos y solares se instalan en todas las latitudes y longitudes. Por lo tanto, el clima tiene importancia dentro de las elecciones de diseño [8], [70]. En algunos edificios como lo son los no residenciales, los módulos BIPV (Building Integrated PhotoVoltaics) se establecen como fachada para mejorar aún más la producción de energía eléctrica. Sin embargo, dicho diseño tiene un límite de visión en la luz natural del día y una baja producción de energía eléctrica por unidad afectada por los ángulos solares, especialmente en un clima tropical [3].

B. Desafíos Políticos y Normativos.

Las condiciones políticas y normativas se identifican en categoría de desafío porque como se evidencia en la Tabla I algunos países cuentan con avances en la construcción de políticas energéticas que incorporan incentivos para la promoción de edificaciones ZEB, resaltan la necesidad de enlazar la política energética de cada país con las oportunidades de participación de la demanda en los mercados de energía eléctrica a partir de tarifas diferenciadas y la preparación técnica y económica de los usuarios que instalan sistemas de generación a pequeña escala y se convierten en productores- consumidores en la red de distribución local. El éxito de las ZEB depende directamente de las directrices que los países integran en sus gobiernos por medio de regulaciones y normativas, donde se premie el interés medio ambiental y social que representa un ZEB para que pueda ser competitivo económica y tecnológicamente en un mercado de energía eléctrica, como por ejemplo por medio de políticas relacionadas a estándares mínimos de desempeño energético – MEPS y etiquetado en electrodomésticos y dispositivos de usos finales de la energía; así como políticas orientadas a pliegos de electricidad flexibles, con los cuales se promueva un mercado de mejores servicios energéticos, eficiencia energética, compra y venta de electricidad, entre otros.

C. Desafíos Técnicos

Al ser los edificios sistemas complejos donde interactúan multitud de variables, se identifican desafíos producto del diseño pasivo y activos y finalmente los desafíos producto de la convergencia de los dos tipos de diseños. Los desafíos que se resaltan en la revisión referente a los diseños pasivos son la necesidad de crear nuevos materiales de construcción que se adapten a cambios climáticos reales de cada región, las geometrías, las formas físicas del edificio, la percepción de falta de confort de los usuarios al no contar con dispositivos HVAC y las acciones impredecibles de los usuarios que afectan la eficiencia energética [11], [72]. Por otra parte, desde la construcción de los edificios, se debe de tener en cuenta la energía embebida la cual es la energía consumida en la construcción de un proyecto ZEB, especialmente en los materiales de construcción; Esta incluye la energía empleada en la fabricación de los materiales, el transporte de estos y la utilizada por la maquinaria durante la ejecución de la obra [71].

Los desafíos en los diseños activos están ligados a la falta de confiabilidad de los sensores, la poca interoperabilidad entre los dispositivos eléctricos debido a la diversidad de protocolos de comunicación que ocasionan falta de integración entre los componentes de automatización del edificio y los servicios

existentes del edificio (por ejemplo, HVAC, control de iluminación o sistemas de emergencia) [10], [72], [73]. La falta de integración ocasiona que se presenten consumos innecesarios e ineficientes de sistemas HVAC, poca confiabilidad y precisión en sensores de iluminación y aumento en el estrés del usuario por desconocimiento.

Finalmente, la interacción entre variables climáticas y la producción de generación de energía proveniente de fuentes no convencionales generan aversión desde la construcción ya que se debe tener en cuenta la limitación de la disponibilidad de superficie aprovechables para instalar generación renovable [69], [74] y el incremento en costos de construcción en las estructuras de los techos para cumplir con la normativa estructural. Adicionalmente, se presentan desafíos entorno a lograr que el usuario del edificio consuma energía según las señales de disponibilidad del recurso primario renovable que afectan directamente los indicadores de rendimiento energético.

Desde la parte del rendimiento energético existen varios trabajos desde el punto de vista de la técnica y la tecnología que tratan los desafíos de las ZEB en varios enfoques. Por ejemplo en [75] el rendimiento energético se mide por el costo de operación, las emisiones de CO₂ e impacto a la red, variables que están condicionadas con la incertidumbre de las energías renovables y comportamiento humano. Para ello es necesario realizar análisis de sensibilidad, simulación de escenarios de meta que permitan identificar los factores que afectan el rendimiento energético/térmico en los edificios. Además, los edificios con categoría LEB, nZEB y NZEB dependen principalmente de la energía renovable de naturaleza intermitente como solar y eólica, lo que aumenta la incertidumbre, y aunque el uso de baterías para almacenamiento y conexión de respaldo a la red reducirían la incertidumbre, el alto costo de inversión actual de las baterías no permiten generar retornos a la inversión positivos [60], [72].

D. Desafíos Económicos y Sociales

Desde la parte económica existen diferentes desafíos que dificultan la masificación de construcciones sostenibles ya que estas tecnológicas necesitan la disponibilidad de apoyos a la inversión de proyectos ZEB para que sea económicamente viable al igual que la tasa de recuperación de la inversión [8].

Según [56] la diferencia de rendimiento energético está causando una incertidumbre de valoración de la inversión final debido al incremento de costos por: i. el uso de dispositivos con aplicaciones IoT, ii. Contratación de personal idóneo que cuente con los conocimientos necesarios para diseñar proyectos ZEB [14] y iii. Nuevos costos de operación producto de mantenimientos de los nuevos equipos de medición y control remoto. Cabe recalcar que, aunque los sistemas referentes a IoT y redes inteligentes pueden aumentar el consumo energético debido a la demanda de los centros de datos y servidores, estos sistemas optimizan el consumo en general de los edificios, provocando más ahorros que derroches energéticos al igual que económicos.

Los países pueden desarrollar incentivos internos y externos para hacer que los usuarios vean más atractivas las construcciones ZEB. Los internos son incentivos desde la parte financiera, donde los usuarios vean voluntariamente el atractivo de ZEB por medio de facilidades económicas por ejemplo: subvenciones directas, reembolsos y tarifas de solicitud de

desarrollo con descuento e incentivos fiscales, que son los incentivos de construcción ecológica más comunes proporcionados por los gobiernos [76]–[78]. Los incentivos externos que son proporcionados, en gran medida, por los gobiernos que están relacionados con el bienestar y confort de los usuarios, estos son incentivos que se relacionan con el cumplimiento de metas ecológicas [68], [78].

En el estudio realizado en [68] los resultados muestran que un nivel más bajo de ZEB requieren costos más altos, mientras que los propietarios que optan por niveles más altos pueden obtener considerables incentivos y bonos pero con una recuperación a la inversión más demorada, lo que puede ser un problema considerando el ciclo de vida de la ZEB y sus componentes. Para ello es importantes establecer umbrales basados en una metodología de costo óptimo, teniendo en cuenta la vida útil del edificio [56].

Es importante destacar que las tecnologías de generación renovable cuentan con políticas de incentivos financieros, es decir, subsidios de inversión, esquemas de medición neta y tarifa de alimentación, los cuales contribuyen principalmente a la aplicación generalizada de energía renovable [26], [68], [79]. Sin embargo, todavía no se logra reducir los costos de manera que permita masificar el uso de los sistemas de almacenamiento [77]. Para alcanzar un estado PEB se necesitan desarrollar incentivos que hagan viables estas tecnologías en los mercados de energía de los países como, por ejemplo: brindar préstamos a compradores con bajas tasas de interés; creación de fondos remunerativos para proyectos PEB; regulación y beneficios económicos para autogeneradores a pequeña escala; metodología de remuneración para edificaciones que participen activamente en las redes de distribución locales; incentivos derivados de actividades de respuesta de la demanda - RD; entre otros. La importancia de incentivar conceptos como RD radica en que ayudaran a las edificaciones NZEB o PEB a reducir los picos de consumo o trasladarlos a horarios donde se tenga mayor disponibilidad de renovables y todo esto con la participación activa y el comportamiento de los usuarios.

En la parte económica también se debe tener en cuenta el comportamiento de los usuarios ya que tiene que ver directamente con el rendimiento energético del edificio [8], [69]. Una de las necesidades de las personas hacia un edificio es el confort humano, que consiste en la comodidad térmica, visual, acústica y la calidad del aire interior, además de que el entorno contemple el contacto natural, ya que las personas al tener acceso a la naturaleza se ven beneficiadas significativamente en la salud y en la productividad humana [2], [80]. La productividad humana considera factores sociales a los procesos de optimización de los ZEB, por ejemplo en [81] se considera el confort térmico como un factor social y demuestra que se minimiza el PPD (porcentaje de personas insatisfechas), el consumo de energía y el costo simultáneamente; en [82] se integra cuatro valores sociales (confort térmico, calidad del aire, confort auditivo y nivel de luz) en una función objetivo y que se optimiza junto con el costo y el consumo de energía; en [2] el enfoque propuesto considera el acceso a la naturaleza (es decir, el confort térmico logrado por enfriamiento natural y el confort visual logrado por la luz natural) como factores sociales. La utilización de enfriamiento natural por medio de relación ventana - pared y luz natural puede mejorar la salud humana y reducir el consumo de energía del enfriamiento mecánico

(sistemas HVAC) y la iluminación artificial. Desde la parte social también se debe tener en cuenta el impacto de la planificación urbana de ZEB en aspectos como el clima local, ya que son características propias de cada zona y por ende de una determinada comunidad.

Los anteriores estudios son ejemplos de que los diseños pasivos que involucran factores sociales se deben considerar para alcanzar rendimiento energético a la vez que confort para los usuarios. Para ello desde los gobiernos e instituciones educativas se debe generar una conciencia energética en la sociedad [10]. A pesar de ello, encajar las necesidades sociales que ofrecen los ZEB y encaminarlos con la viabilidad económica de estas construcciones es un desafío, puesto que los costos que implican no son posibles de alcanzar sin la intervención de políticas e incentivos que ofrezcan los gobiernos.

IV. OPORTUNIDADES FUTURAS PARA LA DIFUSIÓN DE ZEB

A nivel de edificaciones se tienen oportunidades de crear edificios inteligentes que cumplan con los objetivos de ZEB por medio de la utilización de tecnologías de diseño activo y pasivo y la implementación de sistemas de gestión de energía. Además, se pueden crear directrices para la construcción de nuevas edificaciones, renovación de edificios existentes y utilizar el concepto ZEB para agrupar conjuntos de edificaciones en comunidades o campus universitarios y así estudiar el comportamiento de los ZEBs, con el objetivo de implementar edificaciones de este tipo a gran escala, fomentando también la educación e investigación de los ZEB desde las universidades. Cabe resaltar que los ZEB pretenden mediante técnicas de diseño pasivo y activo relacionados con eficiencia energética reducir los consumos energéticos de las edificaciones y luego, los consumos que no se logren satisfacer por medio de estos, satisfacerlos desde la parte activa por medio de fuentes de generación renovable de energía, acompañados de sistemas de almacenamiento y sistemas de redes inteligentes.

Desde la parte técnica la mayoría de los modelos propuestos para la evaluación y definición de ZEB solo tienen en cuenta el rendimiento energético de los edificios ya sean nuevos o existentes en términos técnicos activos y pasivos (calefacción y refrigeración de espacios con sistemas HVAC eficientes, iluminación eficiente y otros equipos; envolvente del edificio, orientación, sombreado, circulación o estanqueidad del aire, ventilación e iluminación natural, entre otros) [68], [83] junto con la utilización de fuentes renovables (Energía solar y eólica; bomba de calor, calefacción y refrigeración urbana, bioenergía, entre otros) [71], sin considerar la contribución del usuario final al consumo de energía [8]. Por ejemplo en [25] se dice que alcanzar NZEB o PEB técnicamente no es difícil y puede lograrse combinando la práctica estándar de diseño de edificación con suficientes sistemas de generación de energía renovable - ER *in situ*, acompañados de unos sistemas de rendimiento energético tanto con equipos y diseños como en el comportamiento de los usuarios. Por lo anterior, la combinación entre el diseño arquitectónico de bajo consumo respetuoso con el medio ambiente junto con electrodomésticos eficientes, HVAC adecuados, cambio de comportamiento de los ocupantes para la conservación de la energía y la utilización de sistemas

inteligentes puede generar reducciones en la demanda de las edificaciones ya sean nuevas o existentes [3], [84].

La energía sobrante de edificaciones PEB se puede utilizar para diferentes usos, entre los cuales está la movilidad eléctrica por medio de vehículos eléctricos. No obstante, se pueden generar excedentes eléctricos que pueden congestionar la red si se habla de muchas edificaciones ZEB aportando energía al sistema. Lo anterior se puede solucionar considerando a los ZEBs como parte de una red auto sostenible [85], donde se utilice dicha energía, por ejemplo, para aprovechamiento alternativo de los déficits de las hidroeléctricas [86] cuando existe máxima producción en condiciones de verano [26]. Por otra parte, se podrían diseñar sistemas inteligentes de ahorro energético que maximicen el rendimiento energético de las edificaciones ZEB [87].

Se pueden generar en las edificaciones sistemas de automatización de edificio - BAS para optimizar y controlar parámetros importantes acordes con los objetivos ZEB, donde se puedan mantener niveles de comodidad aceptables para los usuarios [8], [88]. Los BAS sirven para para la gestión y el control óptimo de diferentes servicios y dispositivos como: HVAC, ACS, sistemas de iluminación y sombra, conversión y almacenamiento de energía (calefacción y refrigeración), generación de energía en el sitio, monitoreo y gestión de datos, gestión de comunicaciones y seguridad [8], [10].

También se puede recurrir a la utilización de Building Energy Management System – BEMS, que es una solución para BAS, la cual por medio de la infraestructura de sensores y actuadores busca tener control y adquisición de datos del entorno tanto interna como externamente, acompañado de una interfaz donde el usuario también pueda interactuar con el sistema inteligente [89], [90]. Dependiendo del comportamiento del ocupante y los cambios de uso, los BEMS requieren ser flexibles y adaptables a nuevas situaciones operativas. La automatización de edificios y el control de electrodomésticos, sistemas HVAC y de energía renovable, sistemas de almacenamiento y vehículos eléctricos ofrecen un gran ahorro de energía y flexibilidad en respuesta al sistema de distribución de la red [65], [91]. Las comunicaciones de estos edificios se pueden diseñar a partir de medios inalámbricos ya que son de fácil instalación, reducen los costos laborales, facilitan la movilidad y portabilidad de los equipos y tienen una mínima interferencia con los ocupantes y el entorno arquitectónico [10].

Para optimizar y controlar NZEB y PEB se pueden desarrollar sistemas de comunicaciones inalámbricas con los siguientes beneficios: reducciones de costos en cableado, instalación y depuración; reducción en tamaño y peso de cableado; reducción de tiempo de diseño y puesta en servicio; mejorar rendimiento y fiabilidad; mensajería bidireccional mejorada; software y hardware seguros y confiables; capacidad para compartir información; flexibilidad de los equipos; protocolos de comunicación abiertos y adaptables; entre otros [10]. La producción de energía y los requisitos de energía de un ZEB necesitan medición y control en tiempo real [65], lo que conllevaría a la obtención de los siguientes beneficios [10]: maximizar producción de energía mediante decisiones adecuadas; minimizar costos iniciales de inversión de acuerdo a dimensionamiento de ER y condiciones ambientales internas y externas del edificio; la energía adicional producida en un período específico puede usarse para el almacenamiento y la

cobertura de la demanda máxima o puede inyectarse en la red; las condiciones climáticas extremas se pueden cumplir anualmente con acciones de control adecuadas.

Por ende hacia el camino de conseguir un PEB/NZEB ya sea en edificaciones nuevas o existentes se deben desarrollar modelos en tiempo real, además de optimización de los componentes de los edificios en la infraestructura de redes y control de las operaciones, coordinado con la interacción del usuario [10].

A. Comunidades y Campus Universitarios ZEB.

Las oportunidades técnicas de los ZEB se pueden aplicar de manera local en los países para edificaciones individuales o grupo de edificaciones que se complementen entre sí. En los últimos años, la creciente aplicación de nZEB ha aumentado el interés en los edificios de próxima generación llamados comunidad de edificios de energía casi nula (grupos nZEB) [92]. La comunidad nZEB se basa en un concepto de colaboración en el que los edificios pueden compartir libremente sus generaciones de energía renovable, almacenamiento e información entre ellos dentro de la comunidad [93]. Las colaboraciones entre estas edificaciones pueden aportar muchos beneficios a nivel comunitario, como la reducción de los costos de electricidad y la interacción de la red [4], [17]. Se han realizado algunos esfuerzos para explorar la implementación de la comunidad nZEB, como el programa Clinton Climate Initiative C40 [94], el Anexo 51 de IEA ECBCS (Programa de Energía en Edificios y Comunidades de la IEA) [95], el proyecto EnEff Stadt (consultor de concepto de energía para distritos urbanos) [96] y el programa de instalación neta cero del Ejército de EE. UU. [97]. La escala de una comunidad nZEB generalmente no debe ser muy grande debido a factores como problemas de estabilidad, baja inercia, complejidad de control, etc.

Existen diferentes metodologías y estudios de caso referentes a comunidades ZEB, por ejemplo en [4] se evidencia que para tener un rendimiento energético con el método de agrupar edificios es necesario juntar edificaciones con Curvas de Desajuste de Potencia – PMC (por sus siglas en inglés) que se complementen, estas curvas muestran la potencia de un ZEB, cuanto menores valores tengan las PMC menor será la energía que consume de la red, ósea que si alcanza valores negativos es porque la edificación tiene excedentes de energía generada por medio de fuentes renovables. Este agrupamiento además de compartir dicha energía generada también pretende compartir almacenamiento de energía, ya que esto maximiza los beneficios de colaboración. Lo anterior sugiere que nZEB con PMC similares se deben separar. Por otra parte en [98] se realiza un sistema de control integrado para todos los usuarios y todos los sistemas del edificio como un “gran usuario”, lo cual permite aprovechar el autoconsumo, evitar picos y mantener un consumo de energía plano de manera general, lo que se podría aplicar a comunidades ZEB. Para ello es necesario tener un modelo pertinente de generación fotovoltaica y aprovechamiento óptimo del sistema de almacenamiento [99].

Por otra parte, los campus universitarios pueden ser considerados comunidades, pero con características de consumos de edificaciones diferentes a las residenciales, de hecho, generalmente incluyen edificios con diferentes perfiles de uso, que van desde aulas, oficinas y laboratorios hasta

dormitorios, restaurantes, tiendas e instalaciones deportivas. Además, una gran cantidad de personas usan diariamente los edificios universitarios no solo para fines de investigación y educación, sino también para actividades culturales y de vida dentro de los campus. De acuerdo con lo anterior, los campus universitarios son instituciones públicas (o privadas) que consumen mucha energía, la cual no se consume siempre de manera eficiente [7].

Los campus universitarios pueden integrarse con el concepto de ZEB, que generalmente se asocia en términos de campus inteligente. El campus inteligente es una tendencia emergente que permite que las instituciones educativas combinen tecnologías inteligentes con infraestructura física para mejorar los servicios, la toma de decisiones, la sostenibilidad del campus, entre otros [100]. Las universidades o campus inteligentes utilizan activamente las tecnologías inteligentes para abordar los desafíos asociados con el cambio climático, la privacidad de los usuarios y la integración de tecnologías y así desarrollar una red inteligente para generar energía limpia, mejorar el mecanismo de distribución de energía y ayudar en la ejecución sin problemas de las tareas relacionadas con las ciudades inteligentes [101]. Ya que, las universidades son consideradas ciudades inteligentes a pequeña escala, debido a que todos los edificios utilizan principalmente tecnologías compatibles y protocolos de comunicación, por lo que pueden servir de laboratorios vivientes para implementar técnicas ZEB y estudiar su comportamiento para posteriormente implementar estas técnicas a mayor escala [101], [102]. En la medida que se quieran desarrollar Zero Energy Campus - ZEC, es importante la implementación de redes inteligentes, debido a que un campus inteligente necesita comunicación con la generación de energía, edificios y parques utilizando IoT (internet de las cosas) [103] y sensores o actuadores (movimiento, temperatura, luz, humedad), además de conexión con dispositivos móviles inteligentes, conexión con la nube, entre otros [7], [101] que puedan recopilar datos del comportamiento de los usuarios [104]. Por otra parte, existen varias tecnologías para conectar dispositivos IoT como Bluetooth, LoRa, SigFox, Wi-Fi, Zigbee, 4GLTE, etc. Los cuales tienen diferentes requisitos de consumo de energía y velocidades de datos [100].

Por ende, se puede utilizar el concepto de micro redes en los ZEC. Las micro redes son sistemas eléctricos a pequeña escala y su uso está en aumento en las ciudades y los campus universitarios ya que ofrece muchas facilidades desde la gestión [100]. Otro concepto que también va de la mano con ZEBs y redes inteligentes es el de las redes neuronales, las cuales pueden realizar un control predictivo y trabajar en tiempo real conectado a redes de internet, además puede aprender del comportamiento humano e interactuar con los diferentes equipos activos de la edificación [105].

Se podrían desarrollar también campus inteligentes de acuerdo a la clasificación ZEB de edificaciones conectadas a la red propuestas en la Fig. 1. (campus de energía ultra baja - LEC, campus de energía casi nula - nZEB [7], Campus de energía neta cero - NZEC y campus de energía positiva - PEC).

Por otra parte, desde los campus universitarios y las investigaciones en las instituciones educativas que fomenten la utilización de ZEBs, las universidades y grupos de investigación pueden aportar en cuanto las definiciones de ZEB por medio de

competencias, como por ejemplo el Decatlón Solar del Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE), el cual es un programa que desafía a equipos integrados por las universidades. Estos equipos compiten por diseñar, construir y operar casas con energía solar que, al mismo tiempo, son rentables, eficientes en el consumo de energía y atractivas para los usuarios por medio de técnicas pasivas y activas. Solar Decathlon es una competencia que brinda a los estudiantes la oportunidad de crear un proyecto de energía limpia con soluciones de ahorro de energía y construirlo en la vida real [40], [106]. Otro país que apuesta por el desarrollado de ZEBs desde la academia es China, el cual también tiene su propia versión de Solar Decathlon, en [74]. Se estudia un modelo de ZEB llamado Solark I, concluyendo que el costo de inversión de este es razonable y mostrando un rendimiento excelente en los sistemas fotovoltaicos, agua caliente, calefacción, ventilación y aire acondicionado de acuerdo a simulaciones hechas, por lo tanto, dicen que Solark I es totalmente comercializable. Estas iniciativas alientan el espíritu académico e investigativo desde las universidades hacia el rendimiento energético de los edificios como solución a los problemas ambientales, sin afectar la parte económica.

Todo el conocimiento que se genere desde la academia y las oportunidades tecnológicas que se identifiquen referente a los ZEBs deben enfocarse para el desarrollo de edificaciones nuevas como también para la renovación de edificaciones existentes, para ello es importante saber el estado del arte de ambos tipos de edificaciones como se muestra a continuación:

B. Nuevos Edificios.

El avance tecnológico y las políticas ambientalistas actuales alientan la adopción de las edificaciones ZEB en el mundo. Iniciativas como las de la EPBD de la UE, que empezó a exigir desde el 31/12/2020 que todas las edificaciones nuevas sean nZEB y que cuentan con hitos indicativos para 2030, 2040 y 2050 [15], [21] generan en la sociedad un espíritu de conciencia energética para el futuro. Estas iniciativas además de ser unas obligaciones regulatorias, son oportunidades para desarrollar un negocio en base a los ZEB. El rendimiento en los nuevos edificios se incrementará con los años en función de la mejora de las soluciones técnicas disponibles y las limitaciones impuestas por las actualizaciones de las regulaciones. Por ello el rendimiento real de los nuevos edificios debe cumplir con requisitos desarrollados en la fase de diseño para que así se garantice el rendimiento a lo largo de los años y en condiciones externas imprevistas [8].

Además, existe una creciente demanda de edificios con un alto rendimiento energético, los futuros propietarios (millennials) buscan una mayor comodidad, seguridad, accesibilidad y asequibilidad en sus futuros hogares de la mano de un alto grado de eficiencia energética [56].

Hoy en día, debido a todos los avances tecnológicos y materiales de alto rendimiento, se hace viable el diseño de nuevas edificaciones que cumplan con los objetivos ZEB, a pesar de esto, las principales oportunidades en el campo de ZEBs radican en la renovación de edificaciones existentes, ya que, las edificaciones existentes representan la mayor parte de las edificaciones que se van a ocupar en los próximos años, como se muestra a continuación.

C. Renovación de Edificios Existentes.

Las edificaciones existentes son más en comparación con los edificios nuevos [107], en países como Australia los edificios existentes representan el 98% del total de edificios del país; en el Reino Unido y los Estados Unidos representan un 99%. Lo mismo pasa en otros países ya sean desarrollados o en vía de desarrollo [108]. además de esto, los edificios que se ocuparan en los próximos 30 años ya se han construido [109]. Estas edificaciones están asociadas con la corrosión, pérdidas de calor, infiltración de aire y fugas que pueden atribuirse a deficiencias en cuanto al diseño y mano de obra [110].

Una gran cantidad de edificios existentes aún están excluidos de la actualización de energía para la optimización. En particular, en aquellos países de Europa, donde una gran cantidad de edificios históricos todavía se utilizan para uso público o privado, el intento de cumplir con los crecientes estándares de energía requeridos por las políticas resulta ser demasiado costoso o no aplicable [8]. Por otra parte, en algunas partes del mundo como Egipto y Rumania la identidad arquitectónica juega un papel muy importante, por lo que los conceptos de ZEB deben adaptarse a las raíces culturales y arquitectónicas de los lugares ya sea a la hora de la renovación de edificaciones existentes o construcción de nuevas edificaciones [39], [111].

Los ZEB son ideados para la modernización o renovación de las edificaciones existentes [112], muchos de estos edificios existentes se han modernizado utilizando diversos métodos y tecnologías. Las actualizaciones se han centrado en técnicas y componentes tales como materiales de aislamiento, reacondicionamiento HVAC, la introducción de renovables, tecnologías de energía, acristalamiento inteligente, sistemas de techos verdes, entre otros [8], [108]. Extender el concepto de ZEB para edificaciones existentes es una oportunidad viable para convertir a las ciudades en ciudades inteligentes y neutras en carbono. Fomentar la renovación profunda es una medida efectiva para mejorar la adopción de los objetivos ZEB [56]. Los edificios existentes desempeñan un papel principal para lograr el objetivo de una reducción general de energía para la sociedad, principalmente debido a su alto número en comparación con los nuevos [8]. Además, las políticas actuales que fomentan la renovación de edificaciones existentes generan oportunidades para mejorar del rendimiento energético, reduciendo su impacto ambiental, económico y social [8].

En el momento de pensar en la renovación de edificaciones existentes se debe tener en cuenta el ciclo de vida del edificio que se desea, junto con los costos que conlleva. Luego, para realizar una evaluación del desempeño económico del edificio y análisis de ciclo de vida de la estructura se deben abordar 3 etapas: la primera corresponde a la etapa antes del uso, sus fases son pre construcción (terrenos y tarifas / asesoramiento asociado), la etapa del producto (suministro de materia prima, transporte, fabricación) y el proceso de construcción (transporte, construcción, proceso de instalación); la segunda corresponde a la etapa durante el uso, sus fases son: uso, mantenimiento, reparaciones, reemplazos, restauración, uso de energía operacional y uso operativo del agua; la tercera y última corresponde a la etapa posterior al uso, sus fases son deconstrucción, transporte, procesamiento de residuos para su reutilización, recuperación y / o reciclaje y eliminación [107].

La correcta planificación de estas etapas determinara la viabilidad económica y ciclo de vida para la renovación de una edificación existente. Por todo lo anteriormente expuesto, las oportunidades que genera la adopción de conceptos ZEB en la renovación de edificios existentes además de nuevos modelos de negocios y mercados, pueden generar beneficios económicos, ambientales y sociales, a la vez que se mejora el rendimiento energético en los edificios sin afectar las raíces culturales y arquitectónicas de los países. Por ello desde las edificaciones existentes se evidencia las oportunidades técnicas, tecnológicas y de diseño que se generan para el desarrollo en general de los países encaminados hacia las ciudades inteligentes, así como la agrupación de edificaciones en comunidades como lo son los campus universitarios.

V. CONCLUSIONES

Las ZEB generan oportunidades tanto para el diseño de nuevas edificaciones como para la renovación de edificaciones existentes, las cuales representan la mayor parte de edificaciones que se van a usar en los próximos 30 años.

A pesar de la falta de uniformidad en la definición de ZEB a nivel global, existen conceptos desarrollados por organizaciones o expertos en los campos de las edificaciones sustentables en China, Australia, Estados Unidos, Corea del Sur, Japón y algunos países miembros de la UE. En el caso de Latinoamérica, se cuenta con iniciativas normativas en Chile y Colombia.

El análisis de la normativa actual en ZEB realizada en este artículo de revisión tiene un primer propósito y es el de que los países emergentes se apoyen en las lecciones aprendidas de los países con más experiencia en el tema, para generar sus propias políticas e incentivos con el fin de promover y masificar la construcción y utilización de edificaciones ZEB en cada territorio.

Los criterios para masificar las construcciones ZEB son de diferente naturaleza, (climáticas, ambientales, sociales, económicas, tecnológicas y políticas) y por lo tanto se propone sean abordadas de manera conjunta desde una mirada holística para alcanzar los objetivos ZEB. Estas condiciones generan desafíos políticos y normativos que deben ser desarrollados en cada país con el principal objetivo de atenuar el cambio climático y promover el desarrollo sustentable.

La masificación de las edificaciones ZEB evidencia la necesidad de crear incentivos económicos y arancelarios que alienten la inversión de los ZEB, además de promover, en los mercados locales, la inclusión de nuevas tecnologías con alto rendimiento energético. Paralelamente, los gobiernos deben alentar y concientizar a la población a adoptar medidas de disminución en la demanda eléctrica de las edificaciones, ya que el comportamiento de los usuarios es muy importante en el rendimiento energético de los ZEB.

Una propuesta es que los modelos de negocio que se crean a partir de los ZEB, sean sectorizados según el nivel de ingresos de la población objetivo para que sean competitivos y asequibles. Adicionalmente, se propone invertir en desarrollar el concepto de ciudades inteligentes por medio del estudio de las comunidades ZEB y más específicamente en los Campus Universitarios – ZEC, puesto que estos servirán como laboratorios vivientes de ciudades inteligentes a pequeña escala

y proporcionarán información y datos importantes para aplicaciones de técnicas ZEB a mayor escala.

El ciclo de vida de las edificaciones también alentará a las empresas, negocios y personas en general a apostar por estas tecnologías, debido que es posible recuperar la inversión en ZEB aplicando técnicas adecuadas de diseños pasivos y activos ya sea en edificaciones nuevas o existentes. Para ello, es necesario que los países desarrollen una hoja de ruta acorde con sus necesidades y fortalezas, donde se plasmen objetivos medibles y alcanzables a corto, mediano y largo plazo, independientemente de que se traten de países industrializados o emergentes.

En el presente artículo se observa una tendencia en la que las ZEB serán el futuro de las edificaciones en todo el mundo y que su aplicación en todos los sectores de consumo repercutirá positivamente en la lucha contra el cambio climático, además de generar nuevas oportunidades de negocio y avances tecnológicos que aumenten el confort de las personas, al igual que se diversifica la matriz energética de los países con la inclusión de ciudades inteligentes, micro redes, movilidad eléctrica y demás tecnologías que aporten a un desarrollo sostenible e integral para la sociedad en general.

AGRADECIMIENTOS.

Los autores desean agradecer el apoyo financiero de la Vicedecanatura de Investigación y Extensión de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales) para la financiación de esta investigación a través de la aprobación del proyecto "Laboratorio en gestión activa de la demanda (GESDELEC)", con sistema código Hermes 49435.

REFERENCES

- [1] International Energy Agency - IEA, "Electricity consumption, world 1990-2017. Data & Statistics." [https://www.iea.org/data-and-statistics/?country=WORLD&fuel=Energy consumption&indicator=Electricity consumption](https://www.iea.org/data-and-statistics/?country=WORLD&fuel=Energy%20consumption&indicator=Electricity%20consumption) (accessed Jul. 09, 2020).
- [2] L. Lan, K. L. Wood, and C. Yuen, "A holistic design approach for residential net-zero energy buildings: A case study in Singapore," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 50, no. June, p. 101672, 2019, doi: 10.1016/j.scs.2019.101672.
- [3] X. Li, A. Lin, C.-H. Young, Y. Dai, and C.-H. Wang, "Energetic and economic evaluation of hybrid solar energy systems in a residential net-zero energy building," *Appl. Energy*, vol. 254, no. May, p. 113709, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113709.
- [4] P. Huang and Y. Sun, "A clustering based grouping method of nearly zero energy buildings for performance improvements," *Appl. Energy*, vol. 235, no. September 2018, pp. 43–55, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.10.116.
- [5] IEA (International Energy Agency), "World Energy Outlook 2019." https://www.oecd-ilibrary.org/energy/world-energy-outlook-2019_caf32f3b-en (accessed Nov. 10, 2020).
- [6] International Energy Agency - IEA, "IEA webstore. GlobalABC Roadmap for Buildings and Construction 2020-2050," Jul. 13, 2020. <https://webstore.iea.org/globalabc-roadmap-for-buildings-and-construction-2020-2050> (accessed Nov. 10, 2020).
- [7] M. Guerrieri, M. La Gennusa, G. Peri, G. Rizzo, and G. Scaccianocce, "University campuses as small-scale models of cities: Quantitative assessment of a low carbon transition path," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 113, no. July, p. 109263, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.109263.
- [8] L. Belussi *et al.*, "A review of performance of zero energy buildings and energy efficiency solutions," *J. Build. Eng.*, vol. 25, no. April, p. 100772, 2019, doi: 10.1016/j.job.2019.100772.
- [9] International Energy Agency - IEA, "Climate change."

- <https://www.iea.org/topics/climatechange/> (accessed Nov. 07, 2019).
- [10] D. Kolokotsa, D. Rovas, E. Kosmatopoulos, and K. Kalaitzakis, "A roadmap towards intelligent net zero- and positive-energy buildings," *Sol. Energy*, vol. 85, no. 12, pp. 3067–3084, 2011, doi: 10.1016/j.solener.2010.09.001.
- [11] X. Yang, S. Zhang, and W. Xu, "Impact of zero energy buildings on medium-to-long term building energy consumption in China," *Energy Policy*, vol. 129, no. January 2019, pp. 574–586, 2019, doi: 10.1016/j.enpol.2019.02.025.
- [12] L. Gentile-Polese *et al.*, "Monitoring and Characterization of Miscellaneous Electrical Loads in a Large Retail Environment," Golden, CO (United States), Feb. 2014. doi: 10.2172/1126300.
- [13] International Energy Agency - IEA, "Impacto del Covid-19 en la electricidad - Análisis - IEA," 2021. <https://www.iea.org/reports/covid-19-impact-on-electricity> (accessed Apr. 06, 2021).
- [14] International Energy Agency - IEA, "Build Smart: la estrategia de edificios de Canadá - Políticas - IEA," 2020, Sep. . [https://www.iea.org/policies/7954-build-smart-canadas-buildings-strategy?q=SMART buildings&s=1](https://www.iea.org/policies/7954-build-smart-canadas-buildings-strategy?q=SMART%20buildings&s=1) (accessed Apr. 06, 2021).
- [15] Z. Liu, Q. Zhou, Z. Tian, B. He, and G. Jin, "A comprehensive analysis on definitions, development, and policies of nearly zero energy buildings in China," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 114, no. February 2019, p. 109314, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.109314.
- [16] S. B. Sadineni, S. Madala, and R. F. Boehm, "Passive building energy savings: A review of building envelope components," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 8, pp. 3617–3631, 2011, doi: 10.1016/j.rser.2011.07.014.
- [17] Y. Sun, G. Huang, X. Xu, and A. C. K. Lai, "Building-group-level performance evaluations of net zero energy buildings with non-collaborative controls," *Appl. Energy*, vol. 212, pp. 565–576, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.11.076.
- [18] X. Chen, H. Yang, and L. Lu, "A comprehensive review on passive design approaches in green building rating tools," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 50, pp. 1425–1436, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.06.003.
- [19] S. Attia *et al.*, "Overview and future challenges of nearly zero energy buildings (nZEB) design in Southern Europe," *Energy Build.*, vol. 155, no. 2017, pp. 439–458, 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.09.043.
- [20] S. M. Silva, R. Mateus, L. Marques, M. Ramos, and M. Almeida, "Contribution of the solar systems to the nZEB and ZEB design concept in Portugal – Energy, economics and environmental life cycle analysis," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 156, no. 2016, pp. 59–74, 2016, doi: 10.1016/j.solmat.2016.04.053.
- [21] "Energy performance of buildings directive | Energy." https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en (accessed Jun. 20, 2020).
- [22] A. Hamburg, K. Kuusk, A. Mikola, and T. Kalamees, "Realisation of energy performance targets of an old apartment building renovated to nZEB," *Energy*, vol. 194, p. 116874, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2019.116874.
- [23] K. Heine, A. Thatte, and P. C. Tabares-Velasco, "A simulation approach to sizing batteries for integration with net-zero energy residential buildings," *Renew. Energy*, vol. 139, pp. 176–185, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.02.033.
- [24] G. Pandey, S. N. Singh, B. S. Rajpurohit, and F. M. Gonzalez-Longatt, "Smart DC Grid for Autonomous Zero Net Electric Energy of Cluster of Buildings," in *IFAC-PapersOnLine*, Jan. 2015, vol. 48, no. 30, pp. 108–113, doi: 10.1016/j.ifacol.2015.12.362.
- [25] L. Wang, J. Gwilliam, and P. Jones, "Case study of zero energy house design in UK," *Energy Build.*, vol. 41, no. 11, pp. 1215–1222, Nov. 2009, doi: 10.1016/j.enbuild.2009.07.001.
- [26] E. F. Zalamea-León and R. H. García-Alvarado, "Integración de captación activa y pasiva en viviendas unifamiliares de emprendimientos inmobiliarios," *Ambient. Construido*, vol. 18, no. 1, pp. 445–461, 2017, doi: 10.1590/s1678-86212018000100231.
- [27] K. B. Dokka, T. H., Sartori, I., Thyholt, M., Lien, K., & Lindberg, "A Norwegian zero emission building definition. Passivhus Norden, 15-17."
- [28] D. H. W. Li, L. Yang, and J. C. Lam, "Zero energy buildings and sustainable development implications - A review," *Energy*, vol. 54. Elsevier Ltd, pp. 1–10, Jun. 01, 2013, doi: 10.1016/j.energy.2013.01.070.
- [29] I. B. E. (2018) . International Partnership for Energy Efficiency Cooperation: Paris, France.Taskgroup, "Zero Energy Building Definitions and Policy Activity-An International Review.," [Online]. Available: [https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0,5&q=Zero+Energy+Building+Definitions+and+Policies+Activity+An+International+Review+\(2018\)&btnG&pli=1](https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0,5&q=Zero+Energy+Building+Definitions+and+Policies+Activity+An+International+Review+(2018)&btnG&pli=1).
- [30] P. P. S. D. M. and C. D. Torcellini, "Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition; Preprint (Conference) | OSTI.GOV," Jun. 01, 2006. <https://www.osti.gov/biblio/883663> (accessed Jun. 17, 2020).
- [31] J. Laustsen, "Energy Efficiency Requirements in Building Codes, Energy Efficiency Policies for New Buildings. IEA Information Paper (Book) | ETDEWEB," Mar. 15, 2008. <https://www.osti.gov/etdweb/biblio/971038> (accessed Jun. 17, 2020).
- [32] Dr. Sam C. M. Hui, "Zero energy and zero carbon buildings: myths and facts," no. September, pp. 1–13, 2010, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/281901690_Zero_energy_and_zero_carbon_buildings_myths_and_facts.
- [33] M. Noguchi, A. Athienitis, V. Delisle, J. Ayoub, and B. Berneche, "Net Zero Energy Homes of the Future: A Case Study of the ÉcoTerra TM House in Canada Masa," 2008.
- [34] S. Rosta, R. Hurt, R. Boehm, and M. J. Hale, "Performance of a zero-energy house," *J. Sol. Energy Eng. Trans. ASME*, vol. 130, no. 2, pp. 0210061–0210064, May 2008, doi: 10.1115/1.2844429.
- [35] J. Kramer, A. Krothapalli, and B. Greska, "The off-grid zero emission building," in *Proceedings of the Energy Sustainability Conference 2007*, Feb. 2007, pp. 573–580, doi: 10.1115/ES2007-36170.
- [36] S. Kilkis, "A new metric for net- zero carbon buildings," in *Proceedings of the Energy Sustainability Conference 2007*, Feb. 2007, pp. 219–224, doi: 10.1115/ES2007-36263.
- [37] M. P. E. De Angelis, A.L.C. Ciribini, L.C. Tagliabue, "The Brescia smart campus demonstrator. Renovation toward a zero energy classroom building."
- [38] A. J. Marszal *et al.*, "Zero Energy Building - A review of definitions and calculation methodologies," *Energy Build.*, vol. 43, no. 4, pp. 971–979, Apr. 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.12.022.
- [39] A. A. Muresan and S. Attia, "Energy efficiency in the Romanian residential building stock: A literature review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 74, no. December 2016, pp. 349–363, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.02.022.
- [40] O. Gönülol and A. Tokuç, "Net Zero Energy Residential Building Architecture in the Future," *Exergetic, Energ. Environ. Dimens.*, pp. 39–53, 2017, doi: 10.1016/B978-0-12-813734-5.00002-0.
- [41] "Zebra2020 - Estrategia de construcción de energía casi cero 2020." <https://zebra2020.eu/> (accessed Jun. 20, 2020).
- [42] I. Juraga, M. Paviotti, and B. Berger, "The Environmental Noise Directive at a turning point."
- [43] G. B.-F. Register and undefined 2007, "Strengthening federal environmental, energy, and transportation management."
- [44] Víctor Severino Mendoza Velázquez, "La política energética de los Estados Unidos de América durante el," Feb. 2018.
- [45] Natural Resources Canada, "Details of the R-2000 Standard ," 2012. <https://www.nrcan.gc.ca/homes/learn-about-professional-opportunities/become-energy-efficient-builder/details-r-2000-standard/20588> (accessed Jun. 17, 2020).
- [46] "R2000 Standard," 2012.
- [47] M. Leckner and R. Zmeureanu, "Life cycle cost and energy analysis of a Net Zero Energy House with solar combisystem," *Appl. Energy*, vol. 88, no. 1, pp. 232–241, 2011, doi: 10.1016/j.apenergy.2010.07.031.
- [48] R. W. Murphy, C. K. Rice, V. D. Baxter, and W. G. Craddick, "Ground-Source Integrated Heat Pump for Near-Zero Energy Houses: Technology Status Report," Oak Ridge, TN (United States), Sep. 2007. doi: 10.2172/969947.
- [49] "Ministry of Housing and Urban-Rural Development (MOHURD), PRC | Regional Knowledge Sharing Initiative." <http://rksi.org/organizations/ministry-housing-and-urban-rural-development-mohurd-prc> (accessed Jul. 07, 2020).
- [50] M. Lu and J. H. K. Lai, "Building energy: A review on consumptions, policies, rating schemes and standards," *Energy Procedia*, vol. 158, pp. 3633–3638, 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2019.01.899.
- [51] H. Li, S. Zhang, M. Okumiya, K. Y.-B. Sci, and undefined 2017, "Japan zero energy building development status."
- [52] "Act on the Rational Use of Energy, Japan." http://www.japaneselawtranslation.go.jp/law/detail_main?id=71&vm=4&re= (accessed Jul. 01, 2020).
- [53] X. Huo and A. T. W. Yu, "A comparison of green building policies in asian countries or regions," in *Proceedings of the 21st International Symposium on Advancement of Construction Management and Real*

- Estate*, 2016, 2018, no. 209889, pp. 19–33, doi: 10.1007/978-981-10-6190-5_3.
- [54] H. S. Suh and D. D. Kim, “Energy performance assessment towards nearly zero energy community buildings in South Korea,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 44, pp. 488–498, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.scs.2018.10.036.
- [55] ENTRANZE, “Policies to ENforce the TRAnstition to Nealy Zero Energy in the EU-27.” <https://www.entranze.eu/about/home> (accessed Apr. 06, 2021).
- [56] S. Attia, “Roadmap for NZEB Implementation,” *Net Zero Energy Build.*, pp. 343–369, 2018, doi: 10.1016/b978-0-12-812461-1.00012-5.
- [57] La Agencia Internacional de Energía (AIE), Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), and Ministerio de Minas y Energía(Perú), *América Latina y el Caribe Recomendaciones de Políticas de Eficiencia Energética Regionales*. 2014.
- [58] W. E. Council, “World Energy Trilemma Priority actions on climate change and how to balance the trilemma,” *WEC*, p. 53, 2015.
- [59] International Energy Agency, “Energy, Climate Change and Environment 2016 Insights,” p. 133, 2016, doi: 10.1787/9789264266834-en.
- [60] International Energy Agency, “Programa Operativo Infraestructura y Medio Ambiente 2014-2020 - Políticas - IEA,” 2020, Sep. . https://www.iea.org/policies/12231-operational-programme-infrastructure-and-environment-2014-2020?q=SMART_buildings&s=1 (accessed Apr. 06, 2021).
- [61] D. Besser and F. U. Vogdt, “First steps towards low energy buildings: How far are Chilean dwellings from nearly zero-energy performances?,” *Energy Procedia*, vol. 132, pp. 81–86, 2017, doi: 10.1016/J.EGYPRO.2017.09.642.
- [62] M. B. Piderit, F. Vivanco, G. van Moeseke, and S. Attia, “Net Zero Buildings—A Framework for an Integrated Policy in Chile,” *Sustain. 2019, Vol. 11, Page 1494*, vol. 11, no. 5, p. 1494, Mar. 2019, doi: 10.3390/SU11051494.
- [63] C. Y. T. MINISTERIO DE VIVIENDA, “RESOLUCIÓN NUMERO 0549 DE 2015,” 2015. <http://www.minvivienda.gov.co/ResolucionesVivienda/0549 - 2015.pdf> (accessed Jul. 16, 2019).
- [64] R. D. De Souza E Silva and R. Cavalcante De Oliveira, “Net Zero Energy Building in Brazil: Potencial Smart Buildings?,” *2019 IEEE PES Conf. Innov. Smart Grid Technol. ISGT Lat. Am. 2019*, Sep. 2019, doi: 10.1109/ISGT-LA.2019.8895412.
- [65] S. Attia, *NZEB Case Studies and Learned Lessons*. 2018.
- [66] B. Dean, “Towards zero-emission efficient and resilient buildings.: Global Status Report,” 2016.
- [67] F. Salamone, L. Belussi, L. Danza, T. Galanos, M. Ghellere, and I. Meroni, “Design and Development of a Nearable Wireless System to Control Indoor Air Quality and Indoor Lighting Quality,” *Sensors*, vol. 17, no. 5, p. 1021, May 2017, doi: 10.3390/s17051021.
- [68] Y. Lu, X. P. Zhang, J. Li, Z. Huang, C. Wang, and L. Luo, “Design of a reward-penalty cost for the promotion of net-zero energy buildings,” *Energy*, vol. 180, pp. 36–49, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.05.049.
- [69] K. F. Fong and C. K. Lee, “Towards net zero energy design for low-rise residential buildings in subtropical Hong Kong,” *Appl. Energy*, vol. 93, pp. 686–694, 2012, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.01.006.
- [70] L. F. Cabeza and M. Chàfer, “Technological options and strategies towards zero energy buildings contributing to climate change mitigation: A systematic review,” *Energy Build.*, vol. 219, p. 110009, Jul. 2020, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2020.110009.
- [71] E. Rodriguez-Ubinas *et al.*, “Passive design strategies and performance of Net Energy Plus Houses,” *Energy Build.*, vol. 83, pp. 10–22, Nov. 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.03.074.
- [72] P. Huang, G. Huang, and Y. Sun, “A robust design of nearly zero energy building systems considering performance degradation and maintenance,” *Energy*, vol. 163, pp. 905–919, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.08.183.
- [73] H. Li, S. Wang, and R. Tang, “Robust optimal design of zero/low energy buildings considering uncertainties and the impacts of objective functions,” *Appl. Energy*, vol. 254, p. 113683, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113683.
- [74] C. Peng, L. Huang, J. Liu, and Y. Huang, “Energy performance evaluation of a marketable net-zero-energy house: Solark I at Solar Decathlon China 2013,” *Renew. Energy*, vol. 81, pp. 136–149, 2015, doi: 10.1016/j.renene.2015.03.029.
- [75] Y. Lu, S. Wang, C. Yan, and K. Shan, “Impacts of renewable energy system design inputs on the performance robustness of net zero energy buildings,” *Energy*, vol. 93, pp. 1595–1606, 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.10.034.
- [76] J. M. Taylor, “Sustainable Building Practices: Legislative and Economic Incentives,” *Manag. Innov. a Sustain. Built Environ. MISBE 2011*, no. June, 2011, [Online]. Available: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:20da66f7-8eb7-4900-bdd8-490ac3fbcbb/datastream/OBJ>.
- [77] “Motivation and Expectation of Developers on Green Construction: A Conceptual View.” <http://publications.waset.org/11588/motivation-and-expectation-of-developers-on-green-construction-a-conceptual-view> (accessed Jul. 06, 2020).
- [78] O. A. Olubunmi, P. B. Xia, and M. Skitmore, “Green building incentives: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 59. Elsevier Ltd, pp. 1611–1621, Jun. 01, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.01.028.
- [79] T. Gómez-Navarro and D. Ribó-Pérez, “Assessing the obstacles to the participation of renewable energy sources in the electricity market of Colombia,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 90, no. September 2016, pp. 131–141, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.03.015.
- [80] “Biophilic Design: The Theory, Science and Practice of Bringing Buildings to Life - Stephen R. Kellert, Judith Heerwagen, Martin Mador - Google Libros.” https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=FyNer_nQrW4C&oi=fnd&pg=PT9&ots=y_j39jKPKP&sig=M9PnRWzRgtm8Vb04JLOhfwF-ZGM&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false (accessed Jul. 06, 2020).
- [81] F. P. Chantrelle, H. Lahmidi, W. Keilholz, M. El Mankibi, and P. Michel, “Development of a multicriteria tool for optimizing the renovation of buildings,” *Appl. Energy*, vol. 88, no. 4, pp. 1386–1394, Apr. 2011, doi: 10.1016/j.apenergy.2010.10.002.
- [82] Q. Jin and M. Overend, “FACADE RENOVATION FOR A PUBLIC BUILDING BASED ON A WHOLE-LIFE VALUE APPROACH,” 2012.
- [83] Y. Lu, S. Wang, and K. Shan, “Design optimization and optimal control of grid-connected and standalone nearly/net zero energy buildings,” *Applied Energy*, vol. 155. Elsevier Ltd, pp. 463–477, Oct. 01, 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.06.007.
- [84] W. Wu, H. M. Skye, and P. A. Domanski, “Selecting HVAC systems to achieve comfortable and cost-effective residential net-zero energy buildings,” *Appl. Energy*, vol. 212, no. October 2017, pp. 577–591, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.12.046.
- [85] F. Shariatzadeh, P. Mandal, and A. K. Srivastava, “Demand response for sustainable energy systems: A review, application and implementation strategy,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 45, no. August 2016, pp. 343–350, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.01.062.
- [86] A. Arango-Manrique, S. X. Carvajal-Quintero, and C. Younes-Velosa, “How to promote distributed resource supply in a colombian microgrid with economic mechanism?: System dynamics approach,” *DYNA*, vol. 82, no. 192, 2015, doi: 10.15446/dyna.v82n192.48564.
- [87] J. Byun, S. Park, B. Kang, I. Hong, and S. Park, “Design and implementation of an intelligent energy saving system based on standby power reduction for a future zero-energy home environment,” *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 59, no. 3, pp. 507–514, Aug. 2013, doi: 10.1109/TCE.2013.6626231.
- [88] A. Mohamed, M. Hamdy, A. Hasan, and K. Sirén, “The performance of small scale multi-generation technologies in achieving cost-optimal and zero-energy office building solutions,” *Appl. Energy*, vol. 152, pp. 94–108, Aug. 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.04.096.
- [89] H. Mirinejad, K. C. Welch, and L. Spicer, “A review of intelligent control techniques in HVAC systems,” 2012, doi: 10.1109/EnergyTech.2012.6304679.
- [90] K. McGlenn, B. Yuce, H. Wicaksono, S. Howell, and Y. Rezgui, “Usability evaluation of a web-based tool for supporting holistic building energy management,” *Autom. Constr.*, vol. 84, pp. 154–165, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.autcon.2017.08.033.
- [91] E. Koutroulis and K. Kalaitzakis, “Design of a maximum power tracking system for wind-energy-conversion applications,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 2, pp. 486–494, Apr. 2006, doi: 10.1109/TIE.2006.870658.
- [92] P. Odonkor and K. Lewis, “Adaptive Operation Decisions in Net Zero Building Clusters,” Aug. 2015, doi: 10.1115/detc2015-47290.
- [93] X. Li and J. Wen, “Net-zero energy building clusters emulator for energy planning and operation evaluation,” *Comput. Environ. Urban Syst.*, vol. 62, pp. 168–181, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.compenvurbysys.2016.09.007.
- [94] C. C. I. C40, “C40.” https://www.c40.org/press_releases/press-release-clinton-climate-initiativec40-hybrid-electric-bus-program-breaks-

- ground-in-latin-america (accessed Jun. 22, 2020).
- [95] “International Energy Agency’s Energy in Buildings and Communities Programme.” <https://www.iea-ebc.org/> (accessed Jun. 22, 2020).
- [96] H. Erhorn-Kluttig, H. Erhorn, J. Weber, S. Wössner, and E. Budde, “EnEff:Stadt - Energiekonzept-Berater für Stadtquartiere,” *Bauphysik*, vol. 35, no. 3, pp. 172–180, Jun. 2013, doi: 10.1002/bapi.201310062.
- [97] A. Zhivov *et al.*, “Net Zero Building Cluster Energy Systems Analysis for U.S. Army Installations.”
- [98] L. Martirano *et al.*, “Demand Side Management in Microgrids for Load Control in Nearly Zero Energy Buildings,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 53, no. 3, pp. 1769–1779, May 2017, doi: 10.1109/TIA.2017.2672918.
- [99] M. Mehrdash, F. Capitanescu, P. K. Heiselberg, T. Gibon, and A. Bertrand, “An Enhanced Optimal PV and Battery Sizing Model for Zero Energy Buildings Considering Environmental Impacts,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 56, no. 6, pp. 6846–6856, Nov. 2020, doi: 10.1109/TIA.2020.3022742.
- [100] N. Min-Allah and S. Alrashed, “Smart campus—A sketch,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 59, no. April, p. 102231, 2020, doi: 10.1016/j.scs.2020.102231.
- [101] S. Alrashed, “Key Performance Indicators for Smart Campus and Microgrid,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 60, no. May, p. 102264, 2020, doi: 10.1016/j.scs.2020.102264.
- [102] Ş. Kılıç, C. Wang, F. Björk, and I. Martinac, “Cleaner energy scenarios for building clusters in campus areas based on the Rational Exergy Management Model,” *J. Clean. Prod.*, vol. 155, pp. 72–82, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.10.126.
- [103] D. Kolokotsa *et al.*, “Development of a web based energy management system for University Campuses: The CAMP-IT platform,” *Energy Build.*, vol. 123, pp. 119–135, 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.04.038.
- [104] F. D. Salim *et al.*, “Modelling urban-scale occupant behaviour, mobility, and energy in buildings: A survey,” *Build. Environ.*, vol. 183, p. 106964, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.buildenv.2020.106964.
- [105] T. F. Megahed, S. M. Abdelkader, and A. Zakaria, “Energy management in zero-energy building using neural network predictive control,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 6, no. 3, pp. 5336–5344, Jun. 2019, doi: 10.1109/JIOT.2019.2900558.
- [106] Z. Ma, H. Ren, and W. Lin, “A review of heating, ventilation and air conditioning technologies and innovations used in solar-powered net zero energy Solar Decathlon houses,” *J. Clean. Prod.*, vol. 240, p. 118158, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118158.
- [107] M. Krarti, *Integrated Design and Retrofit of Buildings*. 2018.
- [108] J. Dadzie, G. Runeson, and G. Ding, “Determinants of sustainable upgrade for energy efficiency - The case of existing buildings in Australia,” *Energy Procedia*, vol. 153, pp. 284–289, 2018, doi: 10.1016/j.egypro.2018.10.002.
- [109] “Sustainable Renovation: Strategies for Commercial Building Systems and Envelope - Lisa Gelfand, Chris Duncan - Google Libros.” https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=b_PmAZzJecYC&oi=fnd&pg=PT6&ots=n8keQfc_zg&sig=CRJuMG4P2cPEZJWur8UeMZleIA&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false (accessed Jun. 22, 2020).
- [110] J. Laverge, M. Delghust, S. Van de Velde, T. De Brauwere, and A. Janssens, “Airtightness assessment of newly built single family houses in Belgium,” *Build. Ductwork Air-tightness, 5th Int. Symp. Proc.*, 2010, Accessed: Jun. 22, 2020. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/1854/LU-1141602>.
- [111] R. E. D. Hamed, “Harmonization between architectural identity and energy efficiency in residential sector (case of North-West coast of Egypt),” *Ain Shams Eng. J.*, vol. 9, no. 4, pp. 2701–2708, 2018, doi: 10.1016/j.asej.2017.09.001.
- [112] C. Outline, *Energy Efficiency in Building Renovation*. 2019.

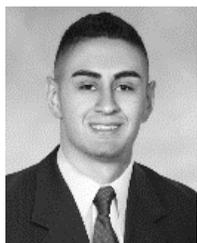


Juan David Marín Jimenez. Ingeniero electricista, magíster y PhD en Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia. Actualmente es gerente de la empresa GAMACO. Sus áreas de interés incluyen las redes inteligentes de energía eléctrica, los mercados de energía eléctrica y la Generación Distribuida.



Sandra Ximena Carvajal. Ingeniera electricista, magíster y PhD en Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia. Actualmente es Profesora en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales. Sus áreas de interés incluyen las redes inteligentes, los mercados de energía eléctrica y la Generación

Distribuida.



Santiago Osorio Ruiz. Ingeniero Electricista de la Universidad Nacional de Colombia, y estudiante de Maestría en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional de Colombia-Sede Manizales. Sus áreas de interés son las energías alternativas, edificaciones sustentables y arquitectura sostenible.