UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Evaluation of criteria to encourage zero energy balance buildings in Colombia

Santiago Osorio Ruiz

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación Manizales, Colombia

2022

Evaluación de criterios para incentivar las edificaciones de balance energético cero en Colombia

Santiago Osorio Ruiz

Trabajo final presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería – Ingeniería Eléctrica

Directora:

PhD. Sandra Ximena Carvajal Quintero

Codirector:

PhD. Juan David Marín Jiménez

Línea de Investigación:

Eficiencia energética

Grupo de Investigación:

Environmental Energy and Education Policy

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación Manizales, Colombia

2022

Dedicatoria

A Dios, mis padres y mis hermanas, que lo son todo para mí.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, especialmente a la Vicedecanatura de Investigación y Extensión de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, por el apoyo para la financiación de esta investigación a través de la aprobación del proyecto “Laboratorio en gestión activa de la demanda (GESDELEC) " Código HERMES 49435.

Quiero agradecerle infinitamente a la profesora Sandra Ximena Carvajal Quintero por ser mi mentora en todo el proceso de pregrado y posgrado, por todos sus consejos, lecciones brindadas y por ser un modelo a seguir para mi desde la Ingeniería Eléctrica y la Universidad.

Gratitud eterna a mis padres Luis Fernando Osorio Martínez y Deisy Guiomar Ruiz Loaiza y mis hermanas Isabella Osorio Ruiz y María Camila Osorio, por ser la motivación para querer salir adelante en la vida y por inculcarme los valores que me hacen ser la persona que soy hoy día.

Gracias a todos mis compañeros de Universidad de pregrado o posgrado, a la selección de futbol de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales y a mis compañeros y mentores en el grupo de investigación Environmental Energy and Education Policy – E3P.

A todos, Dios les pague.

Santiago Osorio Ruiz, 2022

Resumen

Los conceptos de edificaciones sustentables surgieron en el mundo como una solución para contribuir con la mitigación del cambio climático por medio de la reducción en los consumos energéticos y el aumento de la eficiencia energética en las edificaciones. Conceptos como el de edificaciones de energía cero y derivados se han desarrollado en diferentes partes del mundo para promover las edificaciones sustentables. En la actualidad no se tiene una definición general que se pueda aplicar a cada país debido a diferencias que están implícitas en cada región a la hora de planear, diseñar y construir estas edificaciones.

En este documento se revisaron las definiciones relacionadas con entidades gubernamentales a nivel nacional e internacional que promueven la construcción de edificios con balance energético cero, destacando los principales desafíos, oportunidades y retos futuros que se tienen con el desarrollo de estas tecnologías en los países. Se evidenció que los principales desafíos para la implementación de edificaciones de balance energético cero son climáticos, económicos, sociales y tecnológicos. Adicionalmente, promover este tipo de soluciones depende directamente de la intención política de cada región. Además, se evidenciaron oportunidades y retos futuros desde la academia y la industria para desarrollar modelos que fomenten el desarrollo de ciudades inteligentes y edificaciones de balance energético cero.

Por último, se plantearon escenarios y hojas de ruta en un caso de estudio del territorio colombiano para el desarrollo de edificaciones de balance energético, más específicamente desde los campus universitarios, los cuales debido a sus diferentes usos de la energía pueden ser laboratorios vivientes de ciudades a pequeña escala para el desarrollo de modelos y políticas de edificaciones sustentables en Colombia. El desarrollo del modelo se planteó en la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales campus la Nubia y se enfatizó en la estimación de cargas por medio de antecedentes normativos del país, el dimensionamiento de sistemas solares fotovoltaicos y la presentación de escenarios para la implementación de sistemas de adquisición de datos con posibilidad de realizar labores de control y automatización para optimizar el rendimiento energético del campus.

Palabras clave:

Diseños Activos, Diseños Pasivos, Edificaciones de Energía Cero, Eficiencia Energética, Redes Inteligentes.

Abstract

The concepts of green buildings emerged in the world as a solution to contribute to the mitigation of climate change by reducing energy consumption and increasing energy efficiency in buildings. Concepts such as zero energy buildings and derivatives have been developed in different parts of the world to promote green buildings. Currently there is no general definition that can be applied to each country due to differences that are implicit in each region when planning, designing and constructing these buildings.

In this document the definitions related to national and international government entities that promote the construction of buildings with zero energy balance were reviewed, highlighting the main challenges, opportunities and future challenges that faced with the development of these technologies in the countries. It was evidenced that the main challenges for the implementation of zero energy balance buildings are climatic, economic, social and technological, additionally promoting this type of solutions depend directly on the political intention of each region. In addition, future opportunities and challenges were evidenced from academia and industry to develop models that promote the development of smart cities and buildings with zero energy balance.

On the other hand, scenarios and roadmaps are proposed in a case study of the Colombian territory for the development of energy balance buildings, more specifically from university campuses, which due to their different uses of energy can be living laboratories of small-scale cities for the development of sustainable building models and policies in Colombia. The development of the model was proposed at the National University of Colombia, Manizales campus la Nubia, and emphasis was placed on the estimation of loads through the country's normative background, the dimensioning of photovoltaic solar systems and the presentation of scenarios for the implementation of solar systems. data acquisition with the possibility of carrying out control and automation tasks to optimize the energy performance of the campus.

Keywords:

Active Designs, Energy Efficiency, Passive Designs, Smart Grids, Zero Energy Buildings.

Contenido

Lista de figuras ..... **XIII**

Lista de tablas ..... **XV**

Lista de Símbolos y abreviaturas ..... **XVII**

1. Introducción **21**
1.1 Motivación 23
1.2 Objetivos 24
1.2.1 Objetivo General 24
1.2.2 Objetivos Específicos 24
1.3 Estructura del documento 25

2. Planeación energética de las edificaciones de balance energético cero **27**
2.1 Estado del arte 28
2.1.1 Definiciones *Zero Energy Buildings* 28
Clasificación de ZEB 36
2.1.1.1 Ultra Low Energy Buildings – LEB 38
2.1.1.2 Nearly Zero Energy Buildings – nZEB 39
2.1.1.3 Net Zero Energy Buildings – NZEB 39
2.1.1.4 Positive Energy Buildings – PEB 40
2.2 Desafíos 42
2.2.1 Condiciones climáticas y ambientales 43
2.2.2 Condiciones políticas y normativas 45
2.2.3 Condiciones técnicas 47
2.2.4 Condiciones económicas y sociales 50
2.3 Oportunidades 52
2.3.1 ZEBs para innovaciones locales (Comunidades ZEB y Campus universitarios ZEC) 52
2.3.2 Nuevas edificaciones 59
2.3.3 Renovación de edificaciones existentes 60
2.4 Retos futuros 61
2.4.1 La incorporación de políticas claras 61
2.4.2 La participación conjunta de universidad y empresa en procesos de innovación en materiales de construcción 62
2.4.3 Las investigaciones conjuntas en redes de conocimiento que aporten en la gestión de la demanda a precios asequibles para los usuarios finales. 63

3. Caso de estudio: planeación energética de edificaciones ZEB en el Campus La Nubia. 66
3.1 Ultra Low Energy Buildings – LEB 67
3.1.1 Recolección de la información: antecedentes y casos de estudio en Colombia 69

3.1.2 Diagnóstico y caracterización de los bloques del campus La Nubia. 79
Estado del campus: levantamiento e información remanente 79
Caracterización y diagnóstico de los bloques del campus La Nubia..... 82
3.1.3 Estimación de cargas para cada bloque 86
3.1.4 Recomendaciones futuras 96
Aplicación de medidas activas y pasivas 96
Sistemas de Gestión de Energía – SGEn 97
3.2 Nearly Zero Energy Buildings – nZEB 98
3.2.1 Sostenibilidad desde los DERs (corto plazo) 99
Dimensionamiento de sistemas solares fotovoltaicos nZEB..... 99
3.2.2 Análisis de ubicación para sistema solar fotovoltaico nZEB..... 101
Escenario nZEB 1: Distribución de PV en bloques L, P, Q, S2 y W 101
Escenario nZEB 2: Distribución de PV en bloques L y W..... 103
Escenario nZEB 3: Distribución de PV en bloques P, Q y W..... 104
Ubicación óptima de sistema PV nZEB..... 105
3.2.3 Perfil de demanda en condiciones de operación nZEB..... 106
3.3 Net Zero Energy Buildings - NZEB 108
3.3.1 Sostenibilidad desde los DERs (largo plazo) 108
Dimensionamiento sistema solar fotovoltaico NZEB 108
3.3.2 Análisis de ubicación para sistema solar fotovoltaico NZEB. 109
3.3.3 Perfil de demanda en condiciones de operación NZEB. 111
3.3.4 Escenarios primarios para BMS – BAS. 112
Escenario 1: Desarrollo de BMS en los bloques del campus la Nubia..... 115
Escenario 2: Desarrollo de sistema de adquisición de datos SADA junto con equipos de automatización y control 121
3.3.5 Sistema de almacenamiento de energía..... 124
3.4 Positive Energy Buildings - PEB 125
Corto plazo 126
Mediano plazo 127
Largo plazo 127

4. Conclusiones y trabajos futuros..... 130
4.1 Conclusiones generales..... 130
Recomendaciones: 135
4.2 Trabajos futuros..... 137
4.3 Difusión académica..... 138

5. Anexos..... 139
Anexo A: Instructivo de programación Gateway S373 conectado a analizador de redes Power Logic PM 800 y sensor de humedad y temperatura..... 139

6. Bibliografía 154

Lista de figuras

Pág.

Figura 2-1. Clasificación ZEB según revisión internacional. **Fuente:** Elaboración propia. 38
Figura 2-2. Principales desafíos para el desarrollo de ZEB. **Fuente:** Elaboración propia. 43
Figura 2-3. Actividades académicas para el análisis del comportamiento de edificaciones existentes en un Campus Universitario. **Fuente:** Elaboración propia. 63
Figura 3-1. Propuesta metodológica para la evaluación energética de un edificio LEB en Colombia. **Fuente:** Elaboración propia. 67
Figura 3-2. Medias de diseño pasivo y activo recomendadas para la clasificación ZEB en Colombia. **Fuente:** Elaboración propia. 78
Figura 3-3. Campus La Nubia. **Fuente:** Google Earth. 80
Figura 3-4. Perfil de demanda característico de institución educativa. **Fuente:** Environmental Energy and Education Policy – E3P. 89
Figura 3-5. Demanda diaria de los bloques del campus La Nubia. **Fuente:** Elaboración propia. 90
Figura 3-6. Área construida vs Consumo diario de los bloques del campus La Nubia. **Fuente:** Elaboración propia. 92
Figura 3-7. Estado de los bloques del campus la Nubia con respecto al consumo base promedio y consumo base LEB en (kWh/m2*año) aplicando factores de corrección. **Fuente:** Elaboración propia. 95
Figura 3-8. Consumos de bloques cumpliendo estándares LEB del campus la Nubia entre la brecha del consumo base promedio y consumo base LEB (kWh/m2*año). **Fuente:** Elaboración propia. 97
Figura 3-9. Modelo escenario nZEB 1. **Fuente:** Elaboración propia. 102
Figura 3-10. Modelo escenario nZEB 2. **Fuente:** Elaboración propia. 104
Figura 3-11. Modelo escenario nZEB 3. **Fuente:** Elaboración propia. 105
Figura 3-12. Comparación consumos base, LEB y nZEB. **Fuente:** Elaboración propia. 107
Figura 3-13. Posibilidades técnicas para adquisición de datos por medio del Gateway S373. **Fuente:** Elaboración propia.....116
Figura 3-14. Propuesta BMS por medio de S373 para algunos bloques del campus la Nubia. **Fuente:** Elaboración propia.....117
Figura 3-15. Propuesta BMS - BAS de algunos equipos del campus la Nubia por medio de redes LORA. **Fuente:** Elaboración propia. 120
Figura 3-16. Propuesta de sistema de adquisición de datos con automatización y control (BAS) de algunos equipos del campus la Nubia. **Fuente:** Elaboración propia. 121

Figura 3-17. Propuesta BMS con automatización y control (BAS) de algunos equipos del campus la Nubia por medio de redes LORA. **Fuente:** Elaboración propia. 122
Figura 3-18. Mapa de ruta PEB propuesto. **Fuente:** Elaboración propia 125

Lista de tablas

Pág.

Tabla 2-1. Nombres de políticas que incentivan edificios ZEB en el mundo. Fuente: Elaboración propia. 29
Tabla 2-2. Definiciones asociadas a los ZEB. Fuente: Elaboración propia. 30
Tabla 2-3. Algunos programas y políticas en el mundo referentes a ZEB. Fuente: Elaboración propia. 33
Tabla 2-4. Algunos programas y políticas en Latinoamérica referentes a ZEB. Fuente: Elaboración propia. 46
Tabla 3-1. Antecedentes normativos de ZEB en Colombia. Fuente: Elaboración propia. 70
Tabla 3-2. Algunos casos de estudio de ZEB en Colombia. Fuente: Elaboración propia. 73
Tabla 3-3. Línea base de consumo de energía. Fuente: Guía de construcción sostenible para el ahorro de agua y energía en edificaciones [81]. 75
Tabla 3-4. Medidas pasivas y activas para análisis de sensibilidad. Fuente: Guía de construcción sostenible para el ahorro de agua y energía en edificaciones [81]. 75
Tabla 3-5. Medidas de diseño pasivas y activas recomendadas para centros educativos de clima frio. Fuente: Guía de construcción sostenible para el ahorro de agua y energía en edificaciones [81]. 77
Tabla 3-6. Porcentajes mínimos de ahorro de energía. Fuente: Guía de construcción sostenible para el ahorro de agua y energía en edificaciones [81]. 77
Tabla 3-7. DERs y equipos de medida Campus La Nubia. Fuente: Environmental Energy and Education Policy – E3P [144]. 80
Tabla 3-8. Estado actual de los bloques del campus La Nubia. Fuente: Elaboración propia. 85
Tabla 3-9. Carga instalada y distribución de carga de los bloques antiguos e intermedios del campus La Nubia. Fuente: Environmental Energy and Education Policy - E3P y [153] 87
Tabla 3-10. Perfil de demanda de los bloques antiguos e intermedios. Fuente: Elaboración propia. 90

Tabla 3-11. Consumo diario por bloques de campus la Nubia. Fuente: Elaboración propia. 91
Tabla 3-12. Consumos por bloques filtrados con factores de corrección. Fuente: Elaboración propia. 93
Tabla 3-13. Consumos por bloques filtrados con factores de corrección cumpliendo con los estándares LEB. Fuente: Elaboración propia. 96
Tabla 3-14. Estimación de consumo nZEB y potencia PV. Fuente: Elaboración propia. . 99
Tabla 3-15. Dimensionamiento general y económico sistema solar fotovoltaico nZEB. Fuente: Elaboración propia. 100
Tabla 3-16. Potencia PV escenario nZEB 1. Fuente: Elaboración propia. 102
Tabla 3-17. Potencia PV escenario nZEB 2. Fuente: Elaboración propia. 103
Tabla 3-18. Potencia PV escenario nZEB 3. Fuente: Elaboración propia. 104
Tabla 3-19. Comparación consumos base, LEB y nZEB. Fuente: Elaboración propia... 107
Tabla 3-20. Estimación de consumo NZEB y potencia PV. Fuente: Elaboración propia. 108
Tabla 3-21. Dimensionamiento general y económico sistema solar fotovoltaico NZEB. Fuente: Elaboración propia. 109
Tabla 3-22. Escenarios de sistemas PV para NZEB. Fuente: Elaboración propia. 110
Tabla 3-23. Comparación consumos base, LEB, nZEB y NZEB. Fuente: Elaboración propia. 112
Tabla 3-24. Equipos adquiridos en GESDELEC. Fuente: Elaboración propia. 113

Lista de Símbolos y abreviaturas

ACS	Agua Caliente Sanitaria.
AGPE	Autogeneradores a Pequeña Escala.
BAS	Sistemas de Automatización del Edificio.
BEMS	Building Energy Management System.
BIPV	Building Integrated PhotoVoltaics.
BMS	Building Management System.
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe.
CREG	Comisión de Regulación de Energía y Gas.
DER	Recursos Energéticos Distribuidos.
DOE	Departamento de Energía de los Estados Unidos.
EMS	Energy Management System.
EPBD	Energy performance of buildings directive.
ER	Energías Renovables.
E3P	Environmental energy and Education Policy.
FNCER	Fuente no Convencionales de Generación de Energía Renovable.
GESDELEC	Laboratorio en gestión activa de la demanda Eléctrica.
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning.
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
IEA	International Energy Agency.

IEEE	The Institute of Electrical and Electronics Engineers.
IoT	Internet of Things.
kWh	Kilovatio hora.
LEB	Ultra-Low Energy Building.
NTC	Norma Técnica Colombiana.
nZEB	Nearly Zero Energy Building.
NZEB	Net Zero Energy Building.
OR	Operador de red.
PEB	Positive Energy Building.
PHVA	planificar, hacer, verificar y actuar.
PLC	Power Line Communication.
PMC	Curvas de Desajuste de Potencia.
PPD	Porcentaje de Personas Insatisfechas.
RD	Respuesta de la demanda.
RETIE	Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas.
RETILAP	Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público.
SADA	Sistema de Adquisición de Datos.
SCADA	Sistema de Adquisición y Control de Datos.
SGEn	Sistema de Gestión de Energía.
SIN	Sistema Interconectado Nacional.
TBL	The Triple Bottom Line Defined
UE	Unión Europea.

UPME	Unidad de Planeación Minero Energética.
W	Vatios.
WEC	World Energy Trilemma Priority actions on climate change
Wp	Vatios pico.
ZEB	Zero Energy Buildings.
ZEBRA	Estrategia de Construcción de Energía Casi Cero.
ZEC	Zero Energy Campus.
ZNI	Zonas no Interconectadas.

1. Introducción

Actualmente la sociedad enfrenta necesidades energéticas generadas por el creciente consumo de electricidad a nivel global que afecta negativamente el cambio climático [1]. En los edificios el aumento de la demanda eléctrica se debe al aumento de la población y al aumento del consumo per cápita debido al 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 América Latina específicamente, las edificaciones existentes representaron el 24% del consumo total de energía y el 21% de las emisiones de CO2 en 2018 [8]. Esta creciente demanda de energía eléctrica junto con las necesidades ambientales actuales ofrece oportunidades de desarrollo en la industria, transporte y edificios [9], [10].

En Colombia, una considerable parte del consumo de energía es de tipo residencial (16,72%) y sector terciario (comercial, público y servicios) (5,32%) pero que según el balance energético Colombiano BECO del plan de acción indicativo tienen unas pérdidas de energía (térmica y eléctrica) del 46% y 27% respectivamente [11].

Hoy en día se espera cada vez más que los edificios cumplan con niveles de rendimiento más altos y potencialmente más complejos. Deben ser sostenibles, usar energía neta cero, cómodos, aptos para la red, pero económicos de construir y mantener. Por lo anterior, se genera una motivación global de promover políticas energéticas que promuevan la construcción de edificios con consumos racionales, que incluyan sistemas de generación distribuida, sistemas de gestión, redes inteligentes y aplicaciones que permitan la aplicación de balances energéticos cero en las edificaciones [12].

El término edificaciones de cero balance energético (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) [13], [14]. 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.

Los gobiernos nacionales y federales, así como las autoridades estatales y locales están comenzando a avanzar hacia la construcción de ZEBs [15]. Esto genera incentivos gubernamentales que son direccionados hacia la masificación de tecnologías sostenibles ya que por medio de las ZEB además de reducciones en el consumo se busca disminuir las huellas de carbono [16]. Por ejemplo, en Europa uno de los desafíos ambientales por cumplir es renovar y descarbonizar el sector residencial, el cual representa el 75% del total de edificios y el 61% de las emisiones de CO2 [17]. Por ello la construcción de políticas energéticas es un factor crítico que afecta el logro de la eficiencia energética de los edificios [18], [19].

A pesar de esto, no existe un enfoque universalmente reconocido de ZEB, por lo que cada país debe desarrollar localmente su propia definición de acuerdo a contextos reales y únicos de cada zona [20]. En Colombia, por ejemplo, existen algunas normativas y organizaciones que tratan sobre edificaciones sustentables, pero aún no hay reglamentaciones que tengan objetivos que vayan acorde con las ZEB.

En la actualidad se puede recurrir a la utilización de redes inteligentes que por medio de la infraestructura de sensores y actuadores se busque tener control, automatización y adquisición de datos del entono de dispositivos, equipos y variables tanto interna como externamente, acompañado de una interfaz donde el usuario también pueda interactuar con el sistema inteligente [21], [22]. Por lo anterior, los campus universitarios son excelentes laboratorios de ciudades inteligentes a pequeña escala para la implementación de ZEB por medio de redes inteligentes debido a sus diferentes usos de la energía [23].

De acuerdo con lo anterior, en la presente tesis de investigación se proponen escenarios de implementación de ZEB en un campus universitario en Colombia. A partir de este estudio se pudo determinar que es posible crear bases normativas y técnicas para la implementación de ZEB desde los antecedentes regulatorios y normativos del país y que para la optimización de rendimientos energéticos se pueden dimensionar sistemas solares fotovoltaicos y desarrollar sistemas inteligentes como *Building Management Systems* – BMS y *Building Automation Systems* – BAS que lleven a los edificios a un estado de balance energético cero o casi cero.

1.1 Motivación

Las acciones de eficiencia energética generadas por la ZEB pueden ser implementadas para renovación de edificaciones existentes o para idear nuevos modelos y diseños de edificaciones nuevas. En el presente trabajo de investigación se analizan los usuarios del sector terciario (comercial, público y de servicios), específicamente una institución educativa como los es un campus universitario. Para ello se analizan las diferentes oportunidades y desafíos que presentan estas tecnologías y su posibilidad de integrarse en el país, además de complejidad para la planeación energética de edificaciones ZEB desde diferentes puntos de vista, las cuales derivan en aspectos políticos, sociales, climáticos, tecnológicos y económicos de cada región.

Los campus universitarios pueden ser identificados como ciudades a pequeña escala debido a que los edificios o bloques que la conforman presentan diferentes usos de la energía, respondiendo a actividades académicas, deportivas, culturales y administrativas que se realizan en las instituciones educativas.

Para idear modelos de ZEB en un campus universitario es necesario tener diferentes datos energéticos y de gestión para obtener líneas base y desarrollar planes mejora u hojas de ruta que resulten en mejorías en cuanto a eficiencia energética y ahorro energético. Por ello se hace necesario desarrollar sistemas de gestión y adquisición de datos que ayuden a la comunidad universitaria a realizar auditorías y modelos de sistemas de gestión de energía – SGEn que mejoren el rendimiento energético del campus.

De acuerdo con la revisión del estado del arte de las ZEB, cada país debe de desarrollar su propia definición de edificaciones de balance energético cero, debido a las diferentes condiciones de cada región, pero hay muchos trabajos realizados en diferentes partes del mundo que sirven como bases para el desarrollo de un mapa de ruta en temas de edificaciones sustentables para el territorio colombiano. De acuerdo con lo anterior, se generan las siguientes preguntas orientadoras:

¿Qué desafíos y oportunidades generan las ZEB?

¿Qué escenarios o criterios ZEB se podrían plantear en las edificaciones del país?

1.2 Objetivos

A continuación, se presenta el objetivo general y los objetivos específicos planteados para la presente tesis de investigación.

1.2.1 Objetivo General

Evaluar criterios para promover las edificaciones de balance energético cero en el sector terciario de Colombia.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Analizar experiencias internacionales donde se promueva el diseño de edificaciones sustentables.
- Determinar desafíos, oportunidades y retos futuros para incentivar edificaciones de balance energético cero.
- Establecer criterios que permitan impulsar las edificaciones sustentables en el sector terciario en Colombia.

1.3 Estructura del documento

El documento se divide en cuatro capítulos, los cuales presentan los siguientes temas:

En el Capítulo 1, “Introducción” se hace una descripción sobre las edificaciones de balance energético cero y la importancia de analizar y revisar las nuevas tendencias en cuanto a edificaciones sustentables, tanto para fines ambientales como para avanzar en desarrollos tecnológicos. Lo anterior se presenta en una introducción general y también se presentan los objetivos propuestos para la tesis de investigación.

En el Capítulo 2, “Planeación energética respecto a las edificaciones de balance energético cero” se presenta una revisión exhaustiva del estado del arte de las ZEB y se identifican algunas definiciones que se derivan de este concepto. En este capítulo también se destacan los desafíos, oportunidades y retos futuros que presentan estas edificaciones para tener una buena planeación energética de los mismos.

En el Capítulo 3, “Caso de estudio: planeación energética de edificaciones ZEB en Campus la Nubia.” Se define el caso de estudio sobre el que se realiza el análisis de los escenarios ZEB identificados aplicado a la Universidad Nacional sede Manizales campus la Nubia. Allí se analizan como principales aportes el estudio de los antecedentes de edificaciones sustentables y las formas de estimar la demanda eléctrica del campus a través de los datos existentes por medio de una propuesta metodológica de evaluación energética de los edificios. Luego, se dimensionan algunos arreglos solares fotovoltaicos dependiendo del escenario en cuestión. Después, se idean modelos de redes inteligentes por medio de un acercamiento primario al desarrollo de BMS y BAS con sistemas de adquisición de datos y con posibilidades de control y automatización, aplicado a la gestión energética de los edificios. Por último, se analiza la reglamentación y el mercado para la inserción de estas tecnologías en el país.

En el Capítulo 4, “Conclusiones y trabajos futuros” se resumen algunas conclusiones derivadas a partir de los objetivos propuestos en este documento y se recomiendan algunos trabajos futuros y hojas de ruta que se pueden dar a nivel universidad y nivel país sobre el desarrollo de ZEB.

Al final del documento se presentan el anexo del trabajo realizado, el cual contiene el manual de usuario de programación de un Gateway S373 y el proceso de montaje y adquisición de datos de algunos equipos de gestión de la demanda.

2. Planeación energética de las edificaciones de balance energético cero

En este capítulo se presenta una visión general del proceso de planeación energética que se recomienda en algunos países para la inserción en sus mercados de edificaciones de balance energético cero. Para ello se analizó el estado del arte a nivel internacional de las ZEB y las definiciones que se derivan a partir de ellas destacando una clasificación general de ZEB que se pueda aplicar en el país. Además, se definieron desafíos y oportunidades que se deben de tener en cuenta para tener una planeación energética de edificaciones sustentables que resulte en modelos de estructuras que sean eficientes energéticamente y que generen impactos positivos desde los aspectos económicos, ambientales, sociales, políticos y económicos.

2.1 Estado del arte

2.1.1 Definiciones *Zero Energy Buildings*

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, Alemania y Canadá [13], [20].

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 [20]. Por ejemplo, la UE pide a todos sus países miembros que desarrollen su propia definición de edificios de balance energético casi nulo (nZEB por sus siglas en inglés) debido la diferencia de climas y demás condiciones locales [13], [24]. Además, estos países deben desarrollar una metodología integrada a sus necesidades para así mejorar el rendimiento energético [13]. 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, lo que lleva consigo dificultades para comparar diferentes soluciones provenientes de diferentes orígenes [9].

Las necesidades energéticas y rendimiento energético de las ZEB dependen de las condiciones ambientales, económicas, tecnológicas y sociales de cada región [2], [9], [25], [26], al igual que de una voluntad política y normatividad que desarrolle cada país para la instauración de edificaciones sustentables en sus mercados [9]. Debido a la falta de una definición general para los ZEB a nivel internacional cada nación le da un nombre a su política y consideraciones particulares. En la Tabla 2-1 se observa el país o región que tienen implementadas políticas para incentivar la difusión de edificios ZEB, el nombre de la política vigente, se especifica si dicha política considera a las edificaciones existentes, edificaciones nuevas o ambas. Por último, se muestra si dicha política considera porcentajes de reducción de emisiones de CO2 a la atmósfera.

Tabla 2-1. Nombres de políticas que incentivan edificios ZEB en el mundo. **Fuente:** Elaboración propia.

País/Región	Nombre	Tipo de edificación	¿Consideran emisiones de CO2?	REF
UE	Directiva de eficiencia energética de edificios - EPBD	Ambas	NO	[27]
Alemania	Implementación EPBD / EffizienzhausPlus	Ambas	NO	[27]
Dinamarca	Implementación EPBD / Reglamento de construcción danés 2010 (BR10)	Nueva	NO	[28]
Suiza	Implementación EPBD / Minergie-A	Nueva	NO	[29]
Noruega	Edificio de cero emisiones	Nueva	SI	[30]
Reino Unido	Estándar de cero carbono	Nueva	SI	[31]
Francia	Implementación EPBD	Ambas	NO	[29]
EE UU	Edificio de energía cero neta	Nuevas	NO	[32]
Australia		Ambas	SI	[29]

	Edificio con certificación de carbono neutral			
Canadá	Viviendas netas de energía cero / R-2000	Nuevas		[33]
Corea del Sur	Edificios de energía casi nula nZEB	Nuevas	NO	[32]
Japón	Edificio de energía neta cero NZEB	Nuevas	NO	[32]
China	Edificio ecológico pasivo de energía ultrabaja	Ambas	NO	[20]

Como se puede observar, los países que se caracterizan por tener una cultura ambientalista y políticas definidas respecto a la conservación del medio ambiente como Noruega, Reino Unido y Australia definen reducciones de emisiones de gases de efecto invernadero en sus políticas o definiciones de ZEB. Por otra parte, el resto de países que no consideran estrictamente las reducciones de emisiones de CO2 como por ejemplo los países asiáticos China, Japón y Corea de Sur son naciones que aún son muy dependientes de combustibles fósiles debido por ejemplo a necesidades energética de las edificaciones en el invierno, entre otros [20].

Existen otras definiciones o terminologías de ZEB productos del desarrollo de la investigación ya sea por parte de expertos en edificaciones sustentables o por la academia [20]. Estas definiciones se presentan en la Tabla 2-2 junto con su significado y las diferencias o principales características.

Tabla 2-2. Definiciones asociadas a los ZEB**. Fuente:** Elaboración propia.

Definición	Significado	Diferencia
Net Zero Site Energy Building (ZEB en el sitio) [34].	La energía generada a partir de fuentes de energía renovables in situ es igual al consumo de energía de los edificios. El uso de energía generada a partir de las fuentes de energía renovables circundantes se	Límite físico (sitio)

	compensa con el consumo de energía en los edificios.	
Edificio neto de energía cero fuera del sitio (ZEB fuera del sitio) [34].	100% de energía consumida es generada por fuentes renovables. No se requiere que dicha energía sea generada en el sitio.	Límite físico (fuera del sitio)
Edificios independientes cero [35].	Un edificio independiente que no necesita conectarse a la red y puede generar energía para satisfacer las necesidades energéticas del invierno y la noche. Es un edificio que puede almacenar energía en las noches y el invierno.	Límite físico (independiente)
Edificio autónomo o autosuficiente (ZEB autónomo) [36].	Un edificio que está diseñado para ser independiente de los servicios de soporte de infraestructura, como redes eléctricas, sistemas municipales de suministro de agua, sistemas de tratamiento de aguas residuales, alcantarillas pluviales, servicios de comunicaciones.	Límite físico (autonomía)
Edificio de energía cero en la red (ZEB en la red) [37], [38].	La energía entregada por la red al edificio y la energía devuelta por el edificio a la red se equilibra, en otras palabras, el medidor de electricidad lee cero durante el período de cálculo.	Límite físico (en la red)
Edificio de energía cero fuera de la red (ZEB fuera de la red) [39].	Es un edificio que es completamente autosuficiente y autónomo. No está conectado a una instalación de servicios de energía fuera del sitio. Requiere fuentes de energía renovables distribuidas y capacidad de almacenamiento de energía.	Límite físico (fuera de la red)
Net Zero Energy Buildings – NZEBs [35].	Durante más de un año, recibe tanta energía de la red como de las energías renovables. La refrigeración, la calefacción y la iluminación no requieren energía fósil, aunque sí requieren energía de la red.	Límite físico (en la red)

Edificio de energía neta de fuente cero (NZ-source-EB) [34], [40].	Según el edificio, la energía de entrada circundante debe multiplicarse por la distancia desde el punto base. Y el coeficiente de energía es equivalente a la energía circundante, multiplicado por el factor de energía relacionado con el punto base. Teniendo en cuenta la generación y transmisión de energía, significa que el edificio no puede ser autosuficiente. El límite del sistema es la energía necesaria para edificios, sistemas de transmisión, plantas de energía y plantas de energía.	Sistema de acreditación (energía primaria)
Edificio de Costo Cero Neto de Energía: (NZ-cost-EB) [34].	Es una construcción de costo cero neto si los costos de los servicios públicos se recuperan mediante la venta de electricidad generada a partir de fuentes de energía renovables.	Sistema de acreditación (costo de energía)
Edificio de emisiones netas de energía cero (NZ -emissions-EB) [34], [40].	Un edificio que puede generar suficiente energía renovable para compensar las emisiones de gases de efecto invernadero del edificio durante su ciclo de vida. Mientras se compense la misma energía de la energía sin emisión, se pueden realizar cero emisiones en el edificio, y la emisión también depende en gran medida de la tecnología de generación de energía.	Sistema de acreditación (emisión de GEI)
Edificios con cero emisiones de carbono （ZCB） [35].	En al menos un año de operación no utiliza fuentes de energía que producen emisiones netas de dióxido de carbono, y estos edificios son neutros en carbono, al usar la energía generada por fuentes de energía renovables para compensar cualquier energía que genere energía de dióxido de carbono.	Sistema de acreditación (emisión de GEI)
Edificio Net Zero Exergy [41].	En un sistema energético regional, es un edificio con entrada y salida de valor de exergía cero entre edificios y sistemas de energía durante un tiempo específico.	Sistema de acreditación (Exergy)

Edificio de energía positiva / positiva (PEB) [36].	Un edificio que genera energía excedente en un año.	Sistema de acreditación (uso final de energía)
Edificio de baja energía (LEB) [35].	Un edificio energéticamente más eficiente que un edificio normal.	Sistema de acreditación (uso final de energía)

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], [20], [42]. 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 más obviamente en el aspecto de la generación de energía [20], [43].

En la Tabla 2-3 se muestran las políticas, organizaciones, programas o leyes que tiene cada país o región referentes a ZEB donde se puede observar que finalidades u objetivos cuantitativos y/o cualitativos tiene dicha política. Los países tienen unas metas a mediano, corto o largo plazo para aumentar la eficiencia energética de las edificaciones ya sean nuevas o existentes y así mejorar el rendimiento energético de las edificaciones.

Tabla 2-3. Algunos programas y políticas en el mundo referentes a ZEB. **Fuente:** Elaboración propia.

Región	Política/programas/organización/ leyes	Finalidades	Ref.
UE	EPBD	Edificios nuevos nZEB después de 2020.	[13],[20], [7],[44],[16] ,[17].
		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.	

UE	Estrategia de Construcción de Energía Casi Cero 2020 (ZEBRA 2020)	Edificios nZEB/NZEB.	[4], [45].
		Impulsar desarrollo comercial de los nZEB y adopción en los mercados nacionales.	
UE	Séptimo Programa de Acción Ambiental (PEA)	Convertir a la Unión Europea en una economía baja en carbono y hacer que sus ciudades sean más sostenibles.	[7], [46].
EE. UU.	Orden Ejecutiva 13514	Edificios nuevos NZEB para 2030.	[20], [47].
EE. UU.	Ley de Independencia y Seguridad Energética de 2007.	Todos los edificios comerciales NZEB para 2030.	[20], [48].
EE. UU.	Programa de Tecnología de la Construcción del Departamento de Energía de los EE. UU.	Viviendas comercializables NZEB para 2020.	[13],
		Edificios públicos NZEB a bajo costo incremental para 2025.	
Canadá	Natural Resources Canadá - estándar R-2000.	Certificación R-2000 para viviendas para viviendas 50% más eficientes energéticamente.	[20], [33], [49].
Canadá	Natural Resources Canada - Advanced House Program y la Net-Zero Energy Home Coalition.	Desarrollar viviendas de bajo consumo energético en todo Canadá utilizando diversas tecnologías disponibles.	[50], [51].
China	Ministerio de Vivienda y Desarrollo Urbano-Rural (MOHURD) - la Orientación técnica sobre construcción	Mejorar la eficiencia energética de los edificios en China.	[20], [52].
		Crear definición de El edificio verde pasivo de energía ultra baja.	

	ecológica pasiva y de baja energía (Edificio residencial)		
Japón	Estrategia de Tecnología de Ahorro de Energía 2011.	Reducir gradualmente tanto la energía y las emisiones del edificio a cero mediante la mejora de la envolvente del edificio y la adopción de equipos de alta eficiencia y ahorro de energía.	[20].
Japón	Políticas energéticas para la inclusión de ZEB 2014.	Edificios públicos nuevos nZEB para 2020.	[13],[20], [19],[53],[54], [55].
		Casas residenciales y demás edificios nuevos NZEB para 2030.	
		Incentivos económicos para promover edificios ecológicos y edificios residenciales de bajo consumo energético.	
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.	Edificios nuevos ZEB para 2025.	[13],[20],[56].
		Generación de políticas e incentivos para lograr ZEBs de alto nivel.	

De la Tabla 2-3 se resalta la inclusión de políticas donde se incentiva 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.

Con respecto a incentivos entorno a la planeación de construcciones sustentables, los países líderes en este tipo de incentivos son Japón, Corea del Sur y China. Estos países asiáticos ven la oportunidad en la exigencia de nuevas técnicas de diseño arquitectónico a partir del desarrollo de la bioclimática y el desarrollo de materiales con funciones adicionales. Estas funciones son techos y ventanas que a su vez son paneles solares o 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 pudo establecer a partir de la literatura, 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 Bulgaria, Eslovenia, España, Grecia y Hungría no cuentan con dichos planes [15]. 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 en cada territorio.

Clasificación de ZEB

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 consumos de energía en todo el ciclo de vida [20].

Los ZEB se basan en la combinación de técnicas de diseños pasivos y activos. Los diseños pasivos son aquellos en los que la arquitectura considera el clima y el contexto físico espacial de la obra (ventilación, ganancias solares, envolvente térmica y uso de artefactos de alta eficiencia energética en la construcción). Por otra parte, los diseños activos son arreglos mecánicos o eléctricos que ayudan a reducir el consumo energético de la edificación, además usan tecnologías asociadas a las FNCER para la generación de energía en la edificación. Esto significa generación de energía térmica y/o eléctrica por medio de energías renovables (paneles fotovoltaicos, paneles solares térmicos, turbinas eólicas, geotermia, etc.) teniendo en cuenta también la implementación las redes inteligentes como sistemas de adquisición de datos (con posibilidad de automatización y control) y los sistemas de climatización artificial que sean eficientes energéticamente los cuales son necesarios para mantener unos rangos de confort adecuados en la edificación [57]. En resumen, los diseños pasivos están ligados a diseños arquitectónicos donde prevalece el uso de la bioclimática para asegurar el confort necesario sin necesidad de equipos eléctricos que ocasionan consumos de energía eléctrica y aumenten la huella de carbono. Los diseños activos implican refinar la calefacción, ventilación, sistemas HVAC

(heating, ventilation and air conditioning por sus siglas en ingles), iluminación y cualquier otra aplicación de servicios de construcción [58]. Generalmente las estrategias pasivas tienen un costo de inversión de capital adicional bajo en comparación con el beneficio potencial en ahorro de energía [4], [59]. Por tanto, el diseño pasivo es recomendado en muchas pautas de diseño ecológico y sostenible [60].

En [12], [13], [26] se evidenció 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. La clasificación de ZEB se puede presentar por los diferentes tipos de tecnologías que se utilicen y la disminución en consumo energético que terminen presentando las edificaciones. En términos de edificaciones conectadas a la red eléctrica local aparecen conceptos como: edificios de ultra baja energía (LEB 50%), edificios de casi cero energías (nZEB 60% - 75%), edificios de cero energías netas (NZEB 100%) y edificios de energía positiva (PEB >100%) [12], [13], [26]. Comparando estas edificaciones con estructuras convencionales (las cuales no presenten técnicas de diseños activos y/o pasivos que resulten en una disminución del consumo de al menos un 50%) las edificaciones sustentables deben tener disminuciones de consumo que van desde un 50% hasta edificaciones que puedan satisfacer el 100% de su consumo, e incluso, exportar excedentes energéticos a la red eléctrica local o almacenarlos. Para ello se recurre a conceptos de diseño pasivo y activo a diferentes niveles y la utilización de tecnologías eficientes energéticamente, donde la estructura logre una correcta adaptación al clima local [13], [15], [26]. Esta clasificación se muestra en la Figura 2-1.

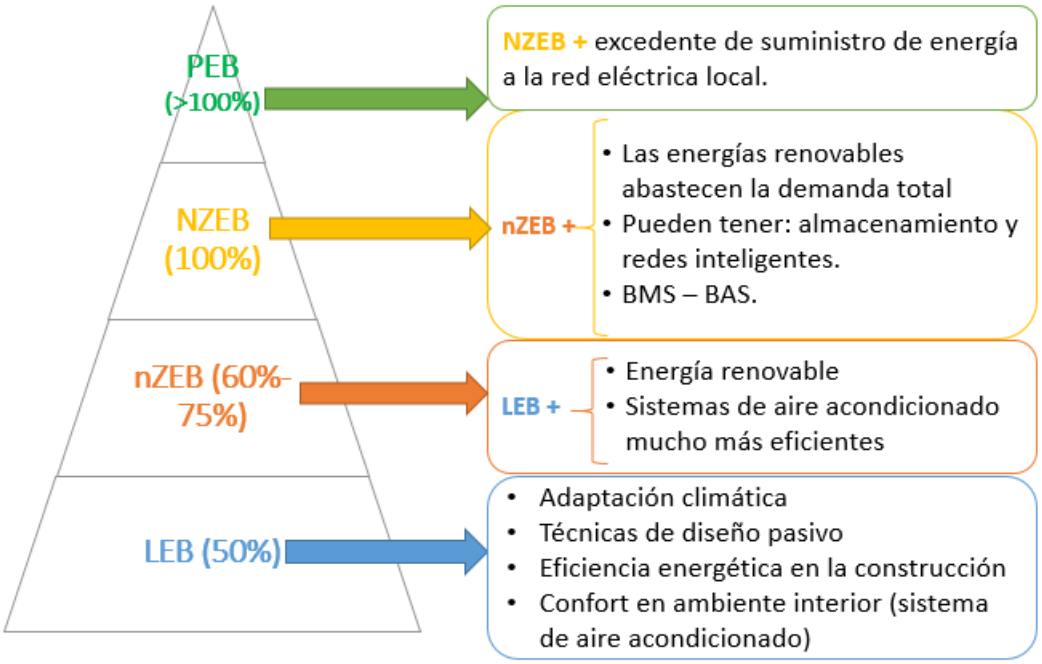


Figura 2-1. Clasificación ZEB según revisión internacional. **Fuente:** Elaboración propia.

2.1.1.1 Ultra Low Energy Buildings – LEB

El primer nivel que se debe alcanzar para ser ZEB es LEB, se debe lograr un 50% de reducción en el consumo base de la edificación adaptándose a las condiciones climáticas y reduciendo la demanda de energía desde el diseño arquitectónico por medio de técnicas pasivas, luego mejorar la eficiencia energética desde los sistemas de construcción y proporcionar confort en el ambiente interior de la edificación con una disminución del consumo energético del mismo [13], [20]. Estas edificaciones responden generalmente a un primer paso de los países en reducir la carga energética de las edificaciones existentes y aumentar así la eficiencia energética de las mismas por medio de normas e incentivos sobre construcción sostenible [61]. Desde este escenario, los sistemas de gestión de energía – SGEn juegan un papel importante para las reducciones de consumos energéticos, ya sea desde la concientización de las personas por medio de la cooperación activa de los usuarios o desde la renovación tecnológica, donde se utilicen materiales y equipos eficientes energéticamente.

2.1.1.2 Nearly Zero Energy Buildings – nZEB

Estas estructuras deberán presentar una reducción energética de 60% a un 75% con respecto a un edificio convencional. Adicional a la implementación de las estrategias de diseños pasivos expuesta en la anterior categoría, los edificios catalogados en la nZEB, deberán utilizar fuentes de generación renovable y proporcionar confort en el ambiente interior de la edificación con un consumo de energía extremadamente bajo [13]. 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 de los desafíos que implica lograr masificar los diseños y construcciones de edificios nZEB son: i) evidenciar la reducción de dióxido de carbono, ii) Tarifación horaria que incentive la reducción de consumos sin perder el confort, encontrar el equilibrio entre la eficiencia energética y la generación de energía renovable [20], [44].

En resumen, un nZEB es un LEB con un rendimiento energético muy alto que utiliza energías renovables y que utiliza un sistema de climatización y confort muy eficiente energéticamente, pero que aún depende mínimamente de la red eléctrica local para suplir sus necesidades energéticas [7]. Los nZEB son de las edificaciones más presentes y populares para la renovación de edificaciones existentes y diseño de nuevas edificaciones en los países con aspiraciones más ambiciosas de reducción energética de las edificaciones de diferentes tipos [62].

2.1.1.3 Net Zero Energy Buildings – NZEB

Son edificios con una reducción energética de un 100% con respecto a un edificio convencional, para ello la edificación deberá adaptarse a las condiciones climáticas y deberá reducir la demanda de energía desde el diseño arquitectónico por medio de técnicas pasivas, mejorar la eficiencia energética desde los sistemas de construcción y la totalidad de la energía utilizada por el edificio debe ser, por lo menos, igual a la cantidad de energía generada por las fuentes renovables presentes en el sitio o fuera del sitio [13].

Un edificio es NZEB, si ya cumple con la categoría nZEB y además es capaz de suplir sus necesidades energéticas en un tiempo determinado (mes/año) únicamente con la energía renovable, considerando también que pueden tener sistemas de almacenamiento de energía, red inteligente y generación distribuida [13], [26]. Es decir, la estructura deberá tener un arreglo de baterías que permita almacenar la energía que se genera por medio de las fuentes de generación distribuida renovables para que pueda ser consumida por ejemplo en las noches, picos energéticos, alimentar movilidad eléctrica o proporcionar electricidad en situaciones de desconexión de la red eléctrica local, entre otros [63].

Además, deberá contar con una red de comunicaciones que conecte dispositivos inteligentes como sensores, actuadores, medidores inteligentes bidireccionales, equipos eficientes energéticamente, entre otros que hagan de la edificación en su conjunto una red inteligente que administre los parámetros climáticos y de confort de la estructura internos y externos a la vez que reduce la energía consumida por la edificaciones, enfocándose en consumir la energía renovable producida in situ o en lugares cercanos [64]. en otras palabras, deberá tener redes inteligentes que permitan la adquisición y gestión de datos por medio de BMS y BAS que a su vez ayuden a los sistemas de gestión y los sistemas activos y pasivos a generar ahorros energéticos.

Los *Building Management System* - BMS son sistemas de adquisición y gestión de datos de construcción que ayudarán a reducir el consumo. Por otra parte, para realizar tareas que también involucran automatización y control, se emplea el concepto de *Building Automation System* - BAS.

Por ende, en los NZEB el balance energético de la energía producida in situ y la energía consumida de la red eléctrica local debe de contrarrestarse, o bien, debe ser de balance cero o muy cercano en un tiempo determinado [13]. 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.

2.1.1.4 Positive Energy Buildings – PEB

Estos edificios 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) [20]. Un PEB es un edificio NZEB que genera más energía eléctrica

de lo que consume el edificio por medio de fuentes renovables [13]. Estos edificios son el resultado de la utilización de diseños pasivos y activos, tecnologías innovadoras de eficiencia energética y sistemas de confort interior en un máximo nivel [12].

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 [12]. Además, un NZEB/PEB puede ser considerado como un edificio neto de energía cero o negativa durante un año típico [26], [65], donde el edificio exporta energía a la red cuando haya un exceso de generación de energía, pero también puede utilizarse dicha energía excedente para otros usos [66]. Este flujo bidireccional debería dar como resultado una exportación neta positiva o cero de energía desde el edificio a la red [6], donde sea posible contribuir a la red para alcanzar zonas energéticamente eficientes [66].

Esta clasificación de edificios LEB, nZEB, NZEB y PEB al garantizar una disminución de más del 50% del consumo de energía generaran ahorros económicos y disminuyen la utilización de combustibles fósiles, lo que convierte a estas estrategias accesibles y viables, con grandes beneficios para la reducción de emisiones nocivas para el medio ambiente y la oportunidad de aplazar inversiones en generación de energía eléctrica, las cuales implican sobrecostos para el usuario final e impactos ambientales por la construcción de nuevas plantas de generación de energía eléctrica [13].

La creación de marcos regulatorios pertinentes es un desafío para cada país debido a que organizaciones de carácter Estatal, las cuales tienen funciones de analizar la incidencia de políticas públicas como CEPAL [67], WEC [68] e IEA [69] resaltan y concuerdan en que el éxito de una política de incentivos y obligatoriedades 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. A continuación, la siguiente sección amplía este concepto incluyente y sistémico referente a los desafíos frente a políticas públicas, específicamente en torno a la inclusión de edificios ZEB.

2.2 Desafíos

Acorde a los conceptos presentados en la sección 2.1, la clasificación de los ZEB y sus diferentes definiciones así como el rendimiento energético de los mismos dependen de la evolución y desarrollo local de las siguientes características: ambientales, económicas, tecnológicas, políticas y normativas [9]. Como se puede ver en la Figura 2-2, los problemas ambientales que enfrenta la humanidad actualmente generan la necesidad de crear políticas de desarrollo sostenible y disminución de gases de efecto invernadero por parte de los países y las organizaciones internacionales. Desde el sector de las edificaciones ya sean nuevas o existentes nacen unas políticas normativas y regulaciones que promueven la inversión e incentivan la utilización de ZEBs desde la parte social, económica y tecnológica de cada región, dependiendo también su definición de ZEB local de condiciones climáticas intrínsecas de cada zona.

Un desafío que se identifica es la integración o unificación de las definiciones de ZEB desde un punto de vista continuo y sistemático por medio de una mirada holística que integre la parte energética, ambiental y económica con el entorno construido y el entorno natural, donde se relacionen también con las necesidades y comportamientos de los usuarios finales [70], [71]. Por ejemplo, en [72] se dijo que existen varios factores clave para el desarrollo de ZEBs en la penetración de los mercados como un marco legislativo adecuado, variables climáticas, el contexto urbano y las características socioeconómicas, donde dichos factores deben tratarse desde su enfoque sistémico para evitar rebotes negativos mutuos. Se puede utilizar la metodología "*The Triple Bottom Line Defined – TBL*" para evaluar de manera holística la sostenibilidad de los ZEB desde los factores sociales, ambientales y económicos. Esta metodología tiene en cuenta la gente, el planeta y el beneficio [73].

Se puede utilizar como metodología para un análisis multidisciplinario de las ZEB el pensamiento sistémico, el cual sirve para evaluar todas las variables y condiciones mencionadas de este tipo de edificaciones. Por lo anterior, las definiciones que se adopten de ZEB deben abordar las necesidades de las personas, deben ser responsables con el planeta y el futuro de los seres humanos pero también estas soluciones deben ser económicamente viables para atraer a los negocios e inversiones a la vez que se es sostenible [7].

A continuación, se presentan los desafíos a partir de las condiciones de las cuales dependen las ZEB.

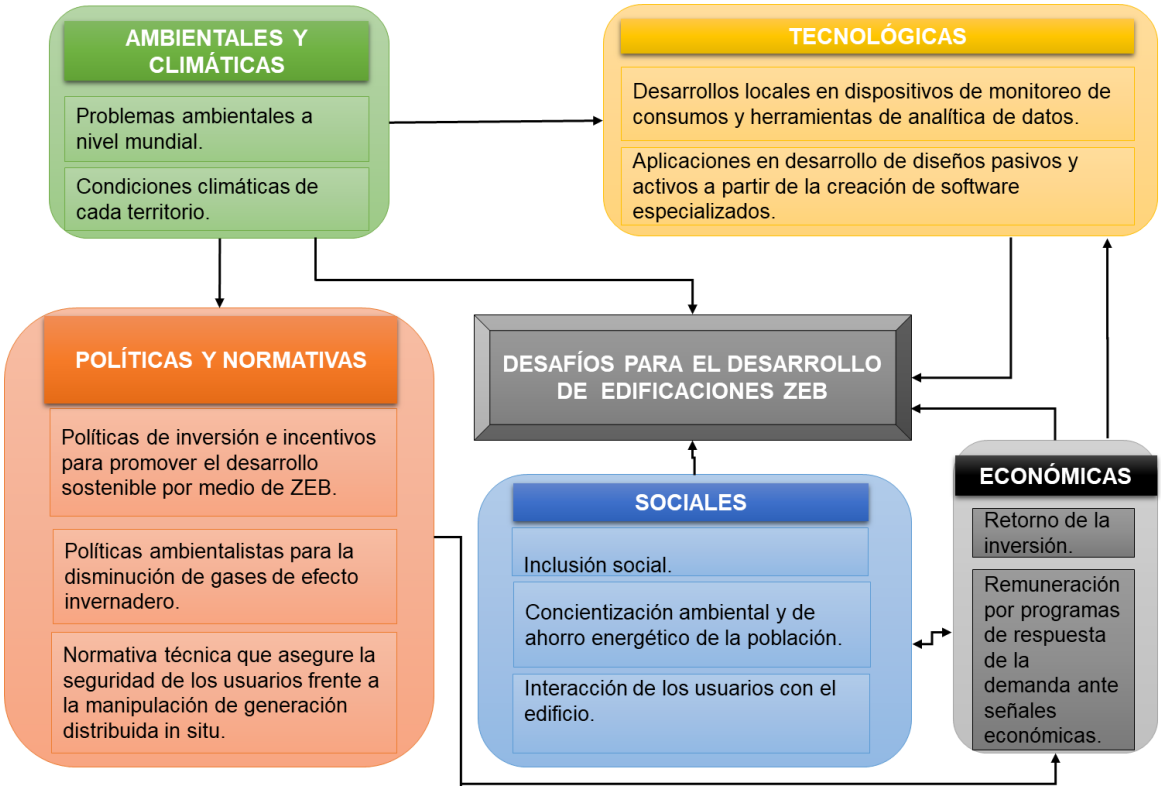


Figura 2-2. Principales desafíos para el desarrollo de ZEB. **Fuente:** Elaboración propia.

2.2.1 Condiciones climáticas y ambientales

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 [74]. 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. En el sector de la construcción se espera que para el año 2050 Las emisiones de CO2 lleguen a un 50% [20]. Por ello la energía relacionada con los edificios desempeñará un papel clave para contrarrestar el cambio climático por medio del desarrollo sostenible [9]. Por lo anterior, el cambio climático genera unos desafíos políticos en la sociedad para idear normas y regulaciones que mitiguen los efectos negativos del calentamiento global y las emisiones de CO2.

El clima juega un papel importante en los sistemas de eficiencia energética y los patrones de consumo de energía en la construcción [25]. Al momento de implementar un ZEB en una región determinada, el clima es el factor más relevante, ya que las condiciones climáticas varían entre y dentro de los países. Por ello para la implementación de ZEB, se generan consecuencias como la complejidad de una minimización simultánea del consumo de energía para calefacción y refrigeración, ACS, iluminación y la maximización de la producción de energía eléctrica y térmica ya que es diferente en relación con el contexto geográfico [9], por ello es importante y necesario idear diferentes soluciones y definiciones de ZEB para diferentes zonas climáticas debido a su variedad. Por ejemplo, las características climáticas específicas a menudo se describen como caluroso, húmedo, dominado por el enfriamiento, verano cálido / invierno cálido (China) [52], verano alto húmedo / invierno cálido (Australia) [75], zona cálida y húmeda debajo de " línea húmeda" [76], y climas tropicales / subtropicales, que incluyen la mayoría de los países del sudeste asiático, y algunos de los países de América Central / del Sur y África.

La fuerte variación climática en algunos países es un gran desafío ya que se necesitan requisitos de desempeños climáticos flexibles y regionales para ZEB. Para las definiciones ZEB, los parámetros descriptivos deben identificarse claramente, pero sus valores objetivo obligatorios deben ajustarse cuidadosamente a los climas individuales. En este contexto, muchas autoridades locales no están preparadas para liderar esta transición [15]. Por ello los países deberán desarrollar definiciones basándose en experiencias internacionales donde se cuente con climas similares al propio. Por otra parte, también existe la alternativa de adelantar iniciáticas de investigación para alcanzar dicho propósito por parte de expertos e instituciones educativas.

A la hora de diseñar también se debe tener en cuenta las condiciones climáticas. 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. 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 perdidas térmicas entre el día y la noche es relevante, 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 [9].

Por otra parte, el papel de varias fuentes de energía renovable en los edificios ha estado recibiendo toda la atención en todo el mundo, particularmente respondiendo a la mitigación del cambio climático [77]. Por ejemplo, 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 [9], [78]. 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].

Sin embargo, es importante extender el desarrollo de ZEB en diferentes partes del mundo con diferentes zonas climáticas para enriquecer más su definición, en China por ejemplo los nZEB, NZEB y PEB están pensados para aumentar el porcentaje de energías renovables con el objetivo de reducir la dependencia de combustibles fósiles. Allí las mejores prácticas de ZEB son un 70% más eficiente energéticamente que un edificio existente convencional, sobretodo en climas fríos y fríos severos. Por lo que estos desafíos climáticos a futuro se pueden ver como oportunidades de desarrollo para edificaciones sostenibles.

2.2.2 Condiciones políticas y normativas

En la Figura 2-2 se resaltan desafíos que generan los problemas ambientales actuales que motivan a los gobiernos y organizaciones a generar políticas de desarrollo sostenible, de donde surgen las edificaciones ZEB. Estas edificaciones tienen gran rendimiento energético, pero este rendimiento depende de las políticas que las incentiven y promuevan y por ello las ZEB disminuyen las huellan de carbono. Existen políticas, normativas y organizaciones desarrolladas en la región europea como la Directiva sobre eficiencia energética de los edificios EPDB que dicta unas directrices para su acogida por parte de cada país miembro [26], también existen diferentes programas y normativas en Europa y

demás países que han desarrollado definiciones de ZEB, al igual que en algunos países asiáticos, Estados Unidos y Canadá, algunas de estas políticas se muestran en la Tabla 2-1 y Tabla 2-3.

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.

Un desafío político en cuanto a las ZEB es que 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 Tabla 2-4.

Tabla 2-4. Algunos programas y políticas en Latinoamérica referentes a ZEB. **Fuente:** Elaboración propia.

Región.	Política/programas/iniciativa	Finalidades
Chile, [79], [80].	Cumplimiento de estándares eficiencia energética OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos).	• 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 TDRe (Norma Chilena de Referencia para el Confort Térmico y la Eficiencia Energética en Edificios) • Creación del sistema de certificación de Edificios Sustentables (CES)

Colombia, [81].	Guía de construcción sostenible para el ahorro de agua y energía. Resolución 540 de 2015.	• 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, [82].	PROCEL EDIFICA (Programa Nacional de Conservación de Energía Eléctrica en Edificios)	• Es un subprograma de PROCEL 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, [82].	GBC *(Green Building Council)*	• 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).

2.2.3 Condiciones técnicas

Al ser los edificios sistemas complejos donde interactúan muchas variables juntas, a la hora del diseño, se debe tener en cuenta los datos climáticos reales de cada región, las geometrías, las formas físicas del edificio, los sistemas HVAC, los sistemas de generación de energía, la ventilación natural y el comportamiento de los usuarios si se desea tener un enfoque de energía cero o positivo [12]. Esta complejidad deriva en una dificultad considerable para la integración y comunicación entre los componentes de automatización del edificio y los servicios existentes del edificio (por ejemplo, HVAC, control de iluminación o sistemas de emergencia), además de la manera de integrar diferentes protocolos de comunicación [12], [83], [84]. Igualmente, desde la parte operativa del edificio existen una serie de parámetros que no pueden ser determinados a priori como las acciones impredecibles de los usuarios que afectan la eficiencia energética, funcionamiento innecesario e ineficiente de sistemas HVAC e iluminación, apertura y cierre de ventanas, influencia de las condiciones climáticas, complejas interacciones entre sistemas pasivos y

activos para el control de clima y generación de energía, intermitencia de las renovables, etc. [12], [38]. Además también se debe tener en cuenta la disponibilidad de superficie aprovechable para instalar generación renovable [77].

Los desafíos que se resaltan referentes 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. 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 [85].

Desde la parte activa se utilizan las redes inteligentes para alcanzar estándares ZEB. Una red inteligente es aquella que cuenta con: comunicación bidireccional en tiempo real, sistemas distribuidos de generación de energía, sensores y actuadores, operación digital, control automático y monitoreo, estado conectado a la red eléctrica, estas redes presentan problemas de seguridad y privacidad [86]. Por ello al usar redes inteligentes los edificios se vuelven estructuras robustas que monitorean y controlan variables, siendo muy dependientes de la veracidad de los datos proporcionados por los sensores y existe el problema de la fiabilidad y precisión de ellos, el cual afecta directamente el rendimiento energético en general de los edificios [13].

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 desde varios enfoques. Por ejemplo en [87], se dijo que 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 necesarios los análisis de sensibilidad, los cuales están siendo utilizados para identificar los factores que afectan el rendimiento energético/térmico en los edificios, tanto el análisis observacional como de los modelos de simulación de energía. El rendimiento energético también dependerá de la modernización de los edificios, material de construcción e impactos del cambio climático en los edificios. Además, en este documento se dice que a diferencia de los edificios tradicionales los sistemas de generación de energía en LEB,

nZEB y NZEB dependen principalmente de la energía renovable de naturaleza intermitente e incontrolable como solar y eólica, lo que aumenta la incertidumbre, pero que con baterías para almacenamiento y conexión de respaldo a la red se podría solucionar, a pesar de esto, según estudios las discrepancias entre condiciones reales y condiciones de diseño no están claras. Concluyen que la introducción de sistemas activos de generación en los edificios podría aumentar la robustez de los sistemas de energía del edificio, lo cual es crucial para el análisis de la sensibilidad.

En [88] se destacaron los desafíos que tiene un NZEB robusto, los cuales son: 1. La brecha del rendimiento energético, 2. El síndrome del edificio enfermo (SBS por sus siglas en inglés) y 3. La toma de decisiones para el diseño. El primero se refiere a la diferencia entre supuestos del diseño y consumo real del edificio debido a la falta de indicadores y umbrales de rendimientos claros y medibles; en la construcción por la mala realización y falta de garantía de calidad; y en la ocupación debido al comportamiento de los ocupantes, control de sistemas y variaciones climáticas. El segundo comprende varios síntomas asociados con la insatisfacción de ocupantes del edificio como problemas de salud, aumento de absentismo y problemas de comodidad como el sobrecalentamiento; los cuales son problemas comunes en edificios de alto rendimiento [89]. El tercero se refiere a la complejidad de la robustez de NZEB el cual a la hora de tomar decisiones genera estrés para los encargados de la toma de decisiones, como por ejemplo al principio el desafío que hay en cuanto a combinar diseños pasivos y activos, lo que hace dedicar más esfuerzo por adelantado en el diseño.

En [71] se identificó que para mejorar el rendimiento energético de NZEB y las experiencias de ocupación se requieren 3 pasos: evaluar el problema, gestionar y resolver el problema y evitar situaciones similares en el futuro. Además, es necesario concentrarse más en la documentación de estudios de caso para extraer lecciones aprendidas y permitir que los nuevos equipos de diseño eviten problemas comunes relacionados con el diseño, construcción y la operación del NZEB. Las lecciones aprendidas en este documento en cuanto a rendimiento energético, entre otros, son: asegurar el monitoreo continuo y el seguimiento del rendimiento; definir objetivos de rendimiento para la etapa de ocupación y establecer un presupuesto de energía; y diseñar sistemas de gestión flexibles con estándares de comunicación abierta.

2.2.4 Condiciones económicas y sociales

Desde la parte económica existen diferentes desafíos que dificultan la integración de los ZEBs en los países, por ejemplo 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 que juega un papel muy importante para su éxito [9].

Además, el rendimiento energético afecta directamente el costo de estas edificaciones. Según [15] la diferencia de rendimiento energético está causando una incertidumbre de valoración de la inversión final además de incremento de costos por adelantado de la contratación planificada y proyectos de diseño de NZEB basados en el incumplimiento, los cuales se consideran como barreras de implementación. Estos incrementos de costos se dan por: i) el uso de dispositivos con aplicaciones IoT, ii) Contratación de personal idóneo que cuente con los conocimientos necesarios para diseñar proyectos ZEB 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.

En el estudio realizado en [74] los resultados mostraron que un nivel más bajo de ZEB requieren costos más altos, mientras que los propietarios que optan por niveles más altos puede 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 [15].

Existen también desafíos en cuanto a la adquisición y entregas de proyectos ZEB ya que no son convencionales, lo que ocasiona barreras en cuanto a la adopción de contratos basados en el desempeño ZEB. Además, desde la industria de la construcción la mayoría de países no están preparados para satisfacer las necesidades y desafíos que llevan consigo los edificios de alta tecnología [15].

Los países pueden desarrollar incentivos internos y externos para hacer que los usuarios vean más atractivas las ZEB y los edificios ecológicos. 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 [90]–[92]; los incentivos externos que son proporcionados en gran medida por los gobiernos están relacionados con el bienestar de los usuarios (confort). estos son incentivos gratificantes los cuales inspiran o alientan a los usuarios a cumplir metas ecológicas o apostar por ZEB, estos incentivos se vean reflejados cuando los usuarios cumplen diferentes requisitos específicos antes de beneficiarse. Los incentivos externos, se dividen en incentivos financieros y no financieros [74], [92].

También 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, etc., los cuales contribuyen principalmente a la aplicación generalizada de energía renovable [66], [74], [93]. En los Estados Unidos, por ejemplo, se reportó que entre 2007 y 2013 existió un abaratamiento del kWh en sistemas fotovoltaicos (PV por su siglas en inglés) a la mitad, y desde 1998 hubo una reducción promedio de 6 % a 8 % por año en el precio [66]. A pesar de esto, en países latinoamericanos como Colombia aún se enfrentan algunas barreras técnicas, sociales y económicas para la inserción de fuentes renovables [93], sumando el hecho de que todavía no se logra reducir los costos de manera que permita masificar el uso de los sistemas de almacenamiento.

Para alcanzar un estado PEB es necesario 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 [94].

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, porque

además de beneficios económicos la satisfacción y confort del usuario es muy importante [9], [77]. Una de las necesidades de las personas hacia un edificio es la comodidad humana, que consiste en la comodidad térmica, la comodidad visual, la comodidad acústica y la calidad del aire interior, además de que el entorno contemple el contacto natural, ya que las personas el tener acceso a la naturaleza se ven beneficiadas significativamente en la salud y en la productividad [2], [95].

Se deben agregar factores sociales a los procesos de optimización de los ZEB, por ejemplo en [96] solo se consideró el confort térmico como un factor social y se minimizó el PPD (porcentaje de personas insatisfechas), el consumo de energía y el costo simultáneamente; en [97] se integraron cuatro valores sociales (confort térmico, calidad del aire, confort auditivo y nivel de luz) en una función objetivo. Este objetivo se optimizó junto con el costo y el consumo de energía. en [59] el enfoque propuesto consideró 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. Los anteriores estudios son claros ejemplos de que los factores sociales tienen peso a la hora de diseñar ZEB para alcanzar rendimiento energético a la vez que confort para los usuarios. Para ello desde los gobiernos e instituciones educativas se debe generar conciencia energética [12]. 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.

2.3 Oportunidades

2.3.1 ZEBs para innovaciones locales (Comunidades ZEB y Campus universitarios ZEC)

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 sistemas de gestión de energía. Además, se pueden crear directrices para la construcción de nuevas edificaciones, renovación de edificaciones

existentes y utilizar el concepto ZEB para agrupar grupos de edificaciones en comunidades o campus universitarios para 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.

Desde la parte técnica un gran número 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) [74], [98] junto con la utilización de fuentes renovables (energía solar y eólica; bomba de calor, calefacción y refrigeración urbana, bioenergía, entre otros) [85] sin considerar la contribución del usuario final al consumo de energía [9]. Por ejemplo en [65] se dijo que alcanzar NZEB o PEB técnicamente no es difícil y puede lograrse combinando la practica estándar de diseño de edificación con suficientes sistemas de generación 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], [99], [100].

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 [101], donde se utilice dicha energía por ejemplo para aprovechamiento alternativo para los déficits de las hidroeléctricas [102] cuando existe máxima producción en condiciones de verano [66]. Por otra parte, se podrían diseñar sistemas inteligentes de ahorro energético que maximicen el rendimiento energético de las edificaciones ZEB [103].

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 [9], [104]. Los BAS sirven 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 [9], [12].

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 buen control y adquisición de datos del entono tanto interna como externamente, acompañado de una interfaz donde el usuario también pueda interactuar con el sistema inteligente [21], [22]. Los BAS son sistemas que controlan los arreglos HVAC, iluminación, fontanería, seguridad y otros sistemas basándose en el control, automatización y correcto funcionamiento de sus activos. Estos sistemas están diseñados para mantener la comodidad de los usuarios, además de que los ingenieros y operarios del edificio pueden agilizar las operaciones que se realizan diariamente. Estos sistemas normalmente representan un alto coste de acondicionamiento de las instalaciones; pero sin embargo, después del año 2000 empezaron a ser muy comunes en edificios comerciales, institucionales e industriales. A pesar de que permiten un control automático en conjunto del edificio, estos carecen de una analítica de datos que ayude a la toma de decisiones en pro de mejorar el rendimiento energético.

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 [71], [105]. Las comunicaciones de estos edificios se pueden diseñar a partir de medios inalámbricos ya que son de fácil instalación, reducen los costes laborales, facilitan la movilidad y portabilidad de los equipos y tienen una mínima interferencia con los ocupantes y el entorno arquitectónico [12].

Un problema común en la planeación de edificaciones ZEBs es la brecha que hay entre los datos o porcentajes de ahorro calculados a la hora del diseño y los datos reales (medios in situ). la solución a este problema es visualizar la productividad energética en tiempo real,

lo cual conllevara a un aumento en el rendimiento y eficiencia energética de la edificación. Por ello, a la hora de pretender diseñar edificaciones ZEB con un consumo de energía neta cero NZEB o de energía positiva PEB se necesita contar con sistemas de automatización del edificio BAS/BMS acompañados de gestión energética SGEn.

Los SGEn son acciones o plataformas que a partir de una información dada pretenden mejorar el rendimiento energético detectando, analizando u controlando el consumo de energía y los costes. Regularmente se rige por indicaciones de la ISO 50001 por medio del ciclo PHVA (planificar, hacer, verificar y actuar) donde se obtienen unos datos de entrada por medio de la monitorización, luego se analizan estos datos para posteriormente realizar una planificación energética donde se comprueben los pronósticos. Los SGEn pueden funcionar junto a un BAS para mejorar el rendimiento energético de un edificio. En resumen, además de tener edificaciones nuevas o existentes que cuenten con sistemas de automatización y sistemas de gestión también son necesarios los sistemas de adquisición de datos SADA para que se pueda generar una visión general de los datos energéticos del edificio. Luego, por medio de los SGEn se puedan generar metas, proyecciones o líneas meta o base de auditorías energéticas para mejorar el rendimiento energético del edificio y poder alcanzar estándares ZEB a corto, mediano o largo plazo.

Por otra parte, 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 [12].

La producción de energía y los requisitos de energía de un ZEB necesitan medición y control en tiempo real [71], lo que conllevara a la obtención de los siguientes beneficios [12]: 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 [12].

Todas estas oportunidades técnicas se pueden aplicar de manera local en los países para edificaciones individuales o grupo de edificaciones que se complemente 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) [106]. La comunidad nZEB se basa en un concepto de colaboración en el que los nZEB pueden compartir libremente sus generaciones de energía renovable, almacenamiento e información entre ellos dentro de la comunidad [107]. Las colaboraciones entre los nZEB pueden aportar muchos beneficios a nivel comunitario, como la reducción de los costos de electricidad y la interacción de la red [4], [59].

Se han realizado algunos esfuerzos para explorar la implementación de la comunidad nZEB, como el programa Clinton Climate Initiative C40 [108], el Anexo 51 de IEA ECBCS (Programa de Energía en Edificios y Comunidades de la IEA) [109], el proyecto EnEff Stadt (consultor de concepto de energía para distritos urbanos) [110] y el programa de instalación neta cero del Ejército de EE. UU. [111]. 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 evidenció que para tener un rendimiento energético con el método de agrupar edificios es necesario juntar edificaciones con Curvas de Desajuste de Potencia – PMC que se complementen. Estas curvas muestran la potencia de un ZEB, cuanto menores valores tenga la 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 de energía renovable. Este agrupamiento además de compartir dicha energía generada también pretende compartir almacenamiento de energía, ya que esto maximiza lo beneficios de colaboración. Lo anterior sugiere que nZEB con PMC similares se deben separar. Por otra parte en [112] 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 buen modelo de generación fotovoltaica y aprovechamiento óptimo del sistema de almacenamiento [113].

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 que cuenten con infraestructura física para mejorar los servicios, la toma de decisiones, la sostenibilidad del campus, entre otros [23]. Las universidades o campus inteligentes utilizan activamente las tecnologías vanguardistas para abordar los desafíos asociados con el cambio climático, la privacidad de los usuarios y la integración de tecnologías. Y así desarrollar una red avanzada 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 [114]. Lo anterior debido a 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 [114], [115].

En la medida que se quieran desarrollar Zero Energy Campus - ZEC, es de vital importancia la implementación de redes inteligentes, ya que un campus inteligente necesita comunicación con la generación de energía, edificios y parques utilizando IoT (internet de las cosas) [116] y sensores o actuadores (movimiento, temperatura, luz, humedad), además de conexión con dispositivos móviles inteligentes, conexión con la

nube, entre otros [7], [114]. 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 [23].

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 [23]. 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 conectado a redes de internet, además puede aprender del comportamiento humano e interactuar con los diferentes equipos activos de la edificación [117].

Se podrían desarrollar también campus inteligentes de acuerdo a la clasificación ZEB de edificaciones conectadas a la red propuestas en la Figura 2-1 (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 [17], [118].

Otro país que apuesta por el desarrollado de ZEBs desde la academia es China, el cual también tiene su propia versión de Decathon Solar. En [38] se estudia un modelo de ZEB llamado Solark I, se concluyó que el costo de inversión es razonable y mostraron 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 tecnologías que se identifiquen referente a los ZEBs deben enfocarse en y distinguirse 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:

2.3.2 Nuevas edificaciones

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 [20], [44]. Estas políticas 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 con base en los ZEB. Hay que decir que el rendimiento en los nuevos edificios se incrementara 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 [9].

Además, actualmente 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 [15]. 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.

2.3.3 Renovación de edificaciones existentes

Las edificaciones existentes presentan mayor cantidad en comparación con los edificios nuevos [119]. 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 [120]. Además de esto, los edificios que se ocuparan en los próximos 30 años ya se han construido [121]. 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 [122].

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 [9].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 [16], [123].

Los ZEB son ideados para la modernización o renovación de las edificaciones existentes [124]. 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 [9], [120].

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 [15]. 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. 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 [9].

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. Al momento de 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 [119]. 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, como se mostró anteriormente.

2.4 Retos futuros

La revisión bibliográfica permitió determinar los siguientes retos futuros para la difusión de edificaciones ZEB.

2.4.1 La incorporación de políticas claras

En los próximos 30 años, las autoridades gubernamentales desempeñarán un papel importante para promover NZEB y establecerán una política concertada que pueda

acelerar la aceptación de la demanda de las edificaciones sustentables [16], [62]. Para ello se debe identificar desde el aspecto técnico estableciendo umbrales mínimos de rendimiento e indicadores de rendimiento [15]. Mediante los casos de estudio referentes a ZEB y los avances técnicos, tecnológicos y de diseño se pueden desarrollar planes a futuro basándose en los antecedentes y experiencias en el tema. Por ejemplo, en [88] se dedujo que el diseño basado en el desempeño y establecimiento de metas y umbrales de desempeño claros y medibles son la mejor metodología para diseñar un NZEB robusto y de alto rendimiento, ya que los objetivos de NZEB es optimizar la demanda de energía a partir del desarrollo de diseños que permitan encontrar un equilibrio entre rendimiento energético, generación de energía renovable, variación de las necesidades de los ocupantes y la calidad interior [15]. Además, las políticas deben de ser desarrolladas por los países teniendo en cuenta sus características climáticas o su “tropicalización”, esto es para que las normativas que se desarrollen abarquen eficientemente las necesidades energéticas que se tienen en determinado lugar con base en las condiciones climáticas del mismo, puesto que en lugares como en Sur América dependiendo de la latitud y/o altitud será más o menos importante considerar cargas de sistemas HVAC como calefacción o refrigeración. Por otra parte, también se debe tener en las políticas una distinción de diferentes tipos de edificaciones a la hora de pensar en ZEBs, puesto que por ejemplo el uso de la energía para edificaciones residenciales es diferente a las necesidades energéticas de un edificio comercial, lo que repercute en el diseño o remodelación de dicho ZEB y estas variables deben de estar bien definidas en dichas normativas, sobre todo en países emergentes.

2.4.2 La participación conjunta de universidad y empresa en procesos de innovación en materiales de construcción

Las metas y umbrales a futuro se justifican con la participación de las empresas y corporaciones que perturbarán el mercado con productos y tecnologías que permitirán a NZEB ser asequible, más inteligente, más conectado y resistente a la red. Además, el ritmo acelerado de las innovaciones tecnológicas asequibles (que incluyen fotovoltaica, bombas de calor, baterías, sistemas HVAC integrados, controles, tecnologías de iluminación y sistemas de automatización) garantizará que los fabricantes y las empresas desempeñen un papel importante en el aumento de la aceptación del mercado NZEB [15].

2.4.3 Las investigaciones conjuntas en redes de conocimiento que aporten en la gestión de la demanda a precios asequibles para los usuarios finales.

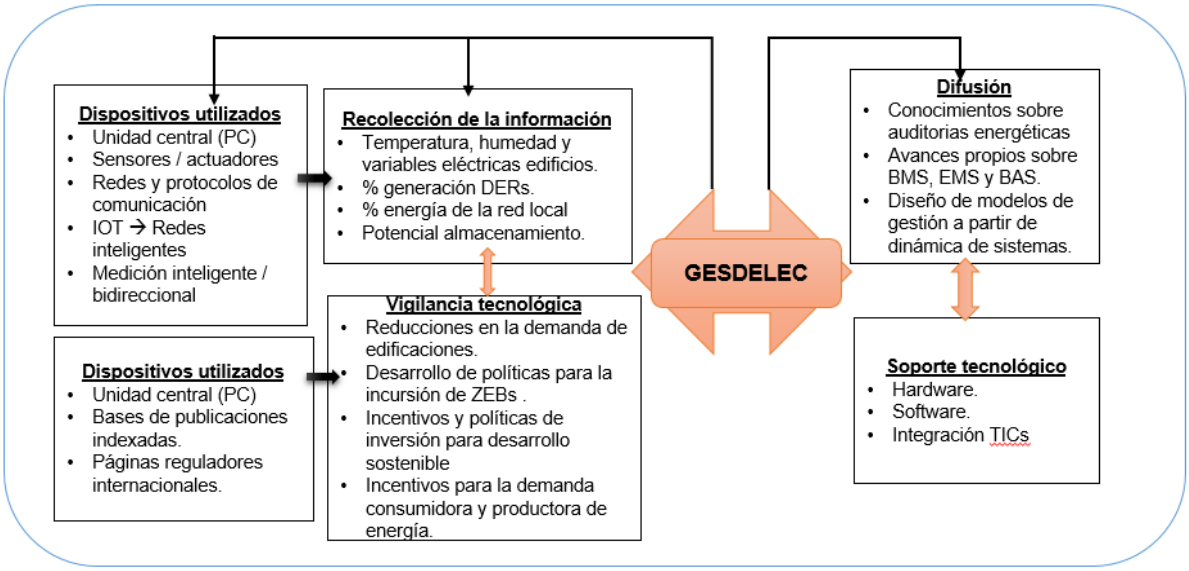


Figura 2-3. Actividades académicas para el análisis del comportamiento de edificaciones existentes en un Campus Universitario. **Fuente:** Elaboración propia.

Las hojas de ruta que adopten los países dependerán de su desarrollo industrial, se deben realizar hojas de ruta diferentes para países industriales y países emergentes por separado. El proceso necesita aportes y participación de diferentes grupos relevantes, que aportan diferentes perspectivas y plazos a los hitos que se establezcan. La hoja de ruta necesita una amplia participación (industria, inquilinos y proveedores, así como gobiernos y autoridades). En los países emergentes, el proceso de desarrollo de la hoja de ruta debe basarse en las necesidades y no en la solución [15]. La formulación de hojas de ruta y el desarrollo de planes de acción junto con herramientas y enfoques de modelado evitan que los propietarios y los profesionales de la construcción se arriesguen y los convierten en expertos en el diseño, construcción y operación de NZEB [71].

La Figura 2-3 ilustra las actividades fundamentales desarrolladas por GESDELEC (Gestión de la demanda activa de la energía eléctrica), laboratorio de la Universidad Nacional de Colombia. Específicamente, en el análisis del desarrollo de edificios ZEB, GESDELEC

realizó un monitoreo de 5 edificios ubicados dentro de un campus universitario. Con el fin de que el conocimiento generado en el laboratorio sea insumo para la implementación de conceptos relacionados con estas tres áreas estratégicas: planeación energética, micro red inteligente y ciudades sostenibles.

Las actividades fundamentales desarrolladas en GESDELEC son recolección de información, vigilancia, procesamiento y análisis de información, difusión y soporte tecnológico.

Para la recolección de datos se utilizaron analizadores de red, medidores de temperatura y contadores de personas. Adicionalmente se monitoreo también la operatividad del reconectador principal y de los recursos energéticos distribuidos (DER- por sus siglas en inglés) tales como, grupos electrógenos y generación solar fotovoltaica instalada. Toda esta información llega al servidor ubicado en el laboratorio de GESDELEC. Paralelo a la adquisición de los datos enviados por los dispositivos eléctricos, también se recolectó información a partir de realizar una vigilancia tecnológica en organizaciones y con base en plataformas reconocidas como son la agencia internacional de la energía [69], [125] (IEA por sus siglas en inglés) IEEE [126] y Science Direct, con el fin de monitorear experiencias nacionales e internacionales en las áreas estratégicas mencionados anteriormente.

El procesamiento y análisis de información enviada por los dispositivos eléctricos se direcciona hacia la revisión energética, basada en la identificación del uso significativo de la energía [127], el desempeño energético actual y la estimación de consumo futuros de energía con aras de aportar en la planeación energética [128] que permitan mejorar indicadores sobre confiabilidad, seguridad y calidad en el suministro. Adicionalmente, se procesan y evalúan políticas, planes, regulación, pronósticos y escenarios energéticos encontrados en la búsqueda de experiencias internacionales que puedan ser aplicables en países emergentes.

A partir de los primeros avances se contempla la difusión de dicha información en diferentes escenarios como semilleros de investigación compuestos por estudiantes de pregrado y posgrado, seminario de investigación conformado por profesores de arquitectura, estadística e ingenierías y posteriormente se clasifica la información a divulgar para la participación en eventos académicos, con el propósito de obtener comentarios de la comunidad académica y científica que permita realimentar el proceso continuamente.

Por último, se destaca el soporte tecnológico que está a cargo de los estudiantes de posgrado, los cuales se encargan de dar asistencia y mantenimiento en hardware, software y lograr integrar las tecnologías de las comunicaciones para mantener la confiabilidad de la información obtenida. En la siguiente sección se hablará más sobre GESDELEC y su implementación en algunos escenarios NZEB para la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales campus las Nubia.

3. Caso de estudio: planeación energética de edificaciones ZEB en el Campus La Nubia.

En el presente capítulo se define el caso de estudio sobre la presentación de escenarios en cuanto a la clasificación de ZEB para el Campus la Nubia. Este caso de estudio se basa en la planeación energética por medio de métodos de diseño pasivos y activos, sobre todo desde la parte de redes inteligente, redes de comunicación, utilización de DERs, SGEn y BMS y BAS, distribuidos en 4 escenarios planteados en la Figura 2-1, como se muestra a continuación.

3.1 Ultra Low Energy Buildings – LEB

En la Figura 3-1 se muestra la metodología desarrollada para realizar una evaluación energética de un edificio y así determinar su estado actual con respecto al primer escenario de la clasificación ZEB descrito en la Figura 2-1 (clasificación LEB). Esta metodología se propone para que pueda ser aplicada a cualquier tipo de edificación del país.

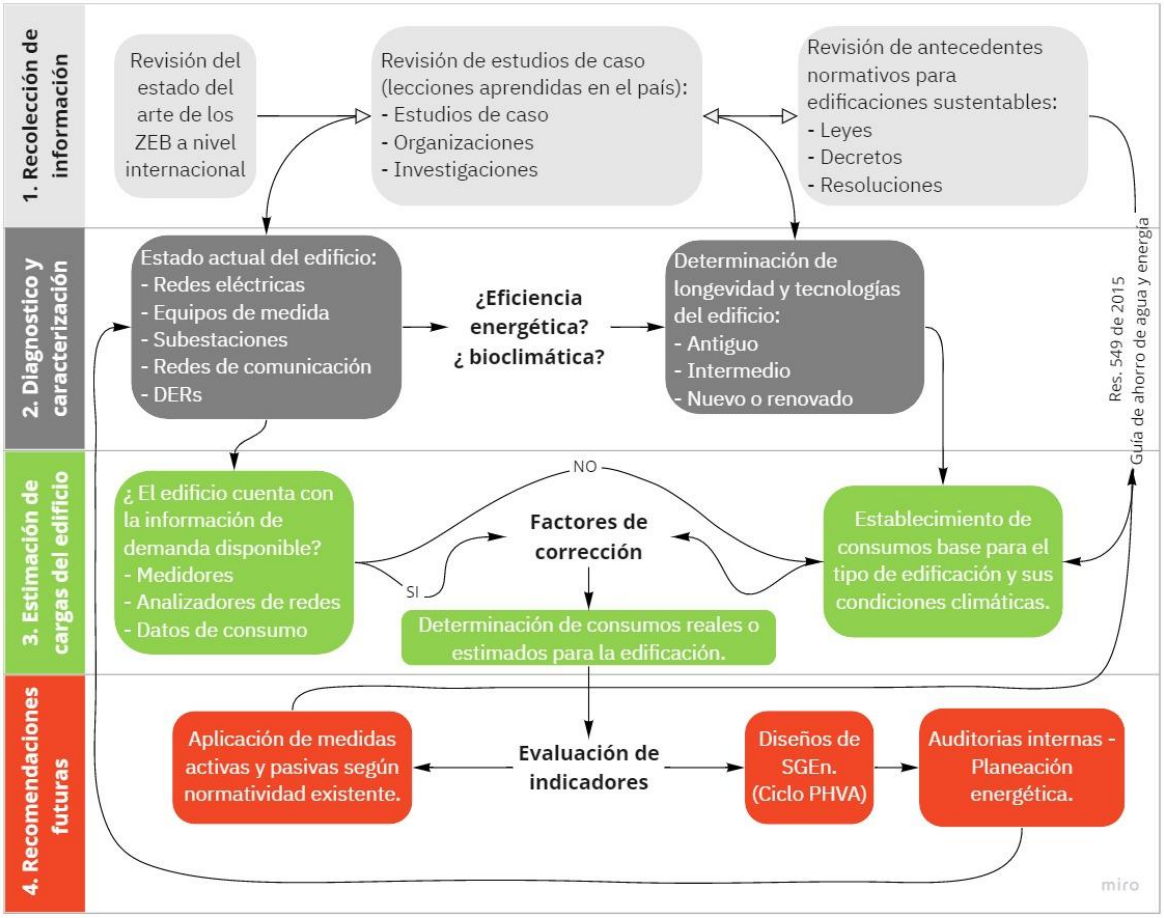


Figura 3-1. Propuesta metodológica para la evaluación energética de un edificio LEB en Colombia. **Fuente:** Elaboración propia.

El caso de estudio escogido en esta tesis es una institución educativa publica (del sector terciario) la cual es La Universidad Nacional de Colombia sede Manizales Campus la Nubia. La evaluación energética en el campus se desarrolló en 4 fases como se puede observar en la Figura 3-1.

En la primera fase “3.1.1 Recolección de la información: antecedentes y casos de estudio en Colombia” lo primero que se hizo fue investigar sobre casos de estudio referentes a edificaciones sustentable en el país. Luego, se analizaron los antecedentes normativos con los que Colombia cuenta con respecto a edificaciones sustentables o sostenibles, determinando unos consumos base obtenidos de la guía de ahorro de energía y agua (resolución 549 de 2015). Esta revisión de antecedentes corresponde a las condiciones políticas y normativas, además de ambientales, tecnológicas, sociales y económicas con la que el país cuenta para el desarrollo de ZEB. Cabe recordar que antes de esta primera fase se realizó una revisión del estado del arte de las edificaciones ZEB a nivel internacional en la sección 2.1.

Luego en la segunda fase “3.1.2 Diagnóstico y caracterización de los bloques del campus La Nubia.”, se elaboró un levantamiento de los bloques del campus con el fin de conocer el estado actual de los bloques, además de los equipos y sistemas con los que cuenta actualmente el campus. Lo anterior es necesario para conocer datos como longevidad de los bloques, posibilidades de los equipos y sistemas de comunicación y diseños pasivos o activos con los que cuenta cada bloque.

Después en la fase 3 “3.1.3 Estimación de cargas para cada bloque”, se realizó la estimación de las cargas o demandas de los bloques de la universidad. lo anterior sirvió para situar el estado energético de los bloques y compararlos con los consumos base promedio y LEB definidos a partir de la resolución 549 de 2015.

Por último en la fase 4 “3.1.4 Recomendaciones futuras”, por medio de la evaluación de indicadores de consumo energético por bloque se pudo determinar las acciones recomendadas para qué los bloques analizados del campus estén cercanos a ser LEB, dando el primer paso hacia edificaciones de balance energético cero en el país, desde el punto de vista de una institución educativa universitaria. A partir de lo anterior, también se pueden idear SGEn y por consiguiente una planeación energética que genere auditorías internas, estas auditorías se pueden volver ciclas por medio del ciclo PHVA y así, se puede aumentar el rendimiento energético y eficiencia energética de los bloques del campus. Estas acciones pueden realizarse por medio grupos de investigación de la universidad o bien por los dirigentes de la misma.

En resumen, la aplicación de la metodología propuesta en la Figura 3-1 consiste en realizar una revisión de antecedentes normativos y casos de estudio a nivel internacional y local

que generen puntos de partida sobre edificaciones sostenibles. Luego, a partir de estos casos de estudio y las lecciones aprendidas se debe realizar un diagnóstico del edificio, donde se haga una revisión exhaustiva del estado de sus redes eléctricas, usos de la energía y estado de longevidad o tecnologías del edificio. Si el edificio cuenta con posibilidad de obtener datos reales de consumo a partir de medidores o analizadores de redes se puede realizar la evaluación de indicadores de consumo para determinar el estado energético del edificio y poder realizar acciones futuras para mejorar la eficiencia energética del edificio. Si no se cuentan con datos reales (como es el caso del campus), se deben de realizar estimaciones a partir de los consumos bases determinados en la revisión de antecedentes teniendo en cuenta también el diagnóstico y caracterización del edificio para finalmente realizar también las recomendaciones futuras de la fase 4.

A continuación se muestra el proceso de evaluación energética realizado en el campus la Nubia a partir de la metodología presentada en la Figura 3-1.

3.1.1 Recolección de la información: antecedentes y casos de estudio en Colombia

Para que las tecnologías ZEB sean efectivas y tengan entrada en el país deben de existir mecanismos regulatorios y políticos que incentiven proyectos para desarrollar edificaciones sustentables. En Colombia por ejemplo, no se encuentra un trabajo, documento o regulación que trate a profundidad este tipo de conceptos, pero en materia de edificaciones sostenibles se pueden encontrar documentos como la resolución 549 de 2015 - Guía de Ahorro de Energía y Agua y algunos otros trabajos y entidades que surgen a partir de esta [11], [81]. Cabe aclarar que, aunque esta resolución exige unos porcentajes de ahorro discriminando por tipo de edificación y clima, estas exigencias no superan el 50% de ahorro energético, por lo que se puede decir que en Colombia aún no hay un modelo de edificación sustentable que se acerque a la definición de ZEB o sus derivados, o al menos no con planes y hojas de ruta similares a los de la EPBD.

En términos normativos para la inclusión de diseños activos a partir de energías renovables, en el país la utilización FNCER es impulsado por leyes como la 1715 de 2014 y la Ley 2099 de 2021, la cual fomenta el uso de la gestión eficiente de la energía y la

respuesta a la demanda RD. Esta ley fomenta la inclusión de fuentes no convencionales de generación de energía, principalmente las de carácter renovable, y también otorga incentivos para inducir bajos consumos [129],[130], adicionalmente, esta ley provocó la formulación de decretos, resoluciones y documentos como la CREG 030 y 038 de 2018 que reglamentan la implementación de FNCER en los autogeneradores a pequeña escala – AGPE y generación distribuida – GD en el Sistema Interconectado Nacional [131] – SIN y en las Zonas no interconectadas – ZNI [132], lo cual es necesario si se desea desarrollar en el país el concepto de ZEB que pueda abastecer su propio consumo con la posibilidad de exportar excedentes a la red eléctrica colombiana.

Hay que decir que desde la parte normativa las edificaciones tienen que cumplir con los criterios y directrices enmarcados en el Reglamento Técnico colombiano de Instalaciones Eléctricas – RETIE [133] y el Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público – RETILAP [134].

En la Tabla 3-1 se presentan leyes, decretos, resoluciones, documentos, iniciativas y organizaciones que tienen que ver el desarrollo de edificaciones sustentables en el país, mostrando cuales son los aportes que tienen como un primer paso para la entrada de edificaciones LEB o nZEB en el país.

Tabla 3-1. Antecedentes normativos de ZEB en Colombia. **Fuente:** Elaboración propia.

Nombre	**Aportes y características**
Resolución 549 de 2015 - Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio [11], [81].	• Expidió la guía de ahorro de agua y energía, la cual contiene exigencias en materia de reducción de consumos de estos servicios, discriminando por el tipo de edificaciones (centros comerciales, oficinas, hoteles, instituciones educativas y hospitales) y el clima (frío, templado, cálido seco y cálido húmedo). • La resolución establece los porcentajes mínimos de ahorro con que deben cumplir las edificaciones nuevas de estos tipos a partir del segundo año de entrada en vigencia de la misma, tomando como referencia una línea base determinada mediante estudios y análisis previos. Los porcentajes de ahorro indicados van desde 10% hasta 45%. • Para alcanzar los porcentajes de ahorro, la guía sugiere la implementación de medidas activas (sistemas mecánicos o eléctricos para garantizar condiciones de confort) o pasivas (que consideran el

	clima, paisaje, localización, orientación, selección de materiales, diseño interior y aprovechamiento de iluminación y ventilación naturales)
Consejo Colombiano de Construcción Sostenible – CCCS [11], [135].	• Sus estudios indican que los sobrecostos asociados a la construcción de edificaciones sostenibles en el país son menores al 5% con periodos de recuperación de la inversión entre tres y cinco años. • Casa Colombia: Herramienta de certificación para la construcción de viviendas sostenibles. • Programa BEA: Programa de Eficiencia Energética en Edificaciones en Bogotá. • Conexión verde: Directorio para la Innovación en Diseño y Construcción Sostenible.
Norma Técnica Colombiana 6112 “Etiquetas Ambientales Tipo I [11], [136].	• Reglamenta el cumplimiento del Sello Ambiental Colombiano – SAC (etiquetas ambientales tipo I) • Fue desarrollado por el Ministerio de Ambiente y es aplicable a edificaciones nuevas y uso diferente a vivienda. • Esta norma incluye criterios para ahorro y uso eficiente del agua y la energía, reducción de emisiones durante la construcción y para la selección de materiales, entre otros. Específicamente en lo relacionado con eficiencia energética abarca diseños arquitectónicos, sistemas de iluminación, HVAC, refrigeración, calentamiento de agua y uso de FNCE.
Sello Ambiental Colombiano – SAC (etiquetas ambientales tipo I) [136].	Los productos identificados con el SAC se caracterizan por: • Hacer uso sostenible de los recursos que emplea (materia prima e insumos). • Utilizar materias primas que no son nocivas para el medio ambiente. • Emplear procesos de producción que involucran menos energía o que hacen uso de fuentes de energía renovables. • Considerar aspectos de reciclaje, reutilización o biodegrabilidad. • Usar materiales de empaque preferiblemente reutilizables o biodegradables y en cantidades mínimas. • Emplear tecnologías limpias o que generen menor impacto relativo sobre el ambiente. • Indicar al consumidor la mejor forma para la disposición final.

Criterios Ambientales para Diseño y Construcción de vivienda urbana y Criterios Ambientales para Diseño y Construcción de Edificaciones Sostenibles con uso diferente a vivienda [11], [136].	Se desarrollan 4 ejes temáticos (agua, suelo, materiales y energía). Con respecto al eje temático de la energía el documento trata sobre: • Uso eficiente de la iluminación natural. • Uso eficiente de la ventilación natural. • Uso eficiente de la asolación. • Aprovechamiento de la energía solar. • Aprovechamiento de la energía eólica. • Aprovechamiento de energía proveniente de biomasa. • Uso de aparatos y dispositivos de menor consumo energético.
Proyecto GEF/PNUD/COL 70476 de eficiencia energética en edificaciones [11].	• Realizó 27 auditorías energéticas en entidades públicas como ministerios, gobernaciones, alcaldías y corporaciones regionales ambientales. De estas auditorías se identificaron potenciales de eficiencia energética para las edificaciones públicas mediante la implementación de diferentes medidas de ahorro. Estas medidas de ahorro identificadas fueron: energías renovables 2,7%, arquitectónicas 10% y equipos 24,3%.
LEY 1995 DE 2019 [137].	• Pretende reglamentar el artículo 30 de la ley 1715 el cual exigirá realizar auditorías energéticas a diferentes tipos de entidades públicas, estas auditorías tienen el objetivo de tener un ahorro mínimo en el consumo de energía del 15% en el primero año respecto al consumo del año anterior, y a partir del segundo año con metas escalonadas definidas a partir de la auditoria y a más tardar para el año 2022.
Decreto 829 de 2020	• Se reglamentan algunos artículos 11, 12, 13, y 14 de la ley 1715 de 2014, se modifica y adiciona el decreto 1625 de 2016, único reglamentario en materia tributaria y se derogan algunos artículos del decreto 1073, único reglamentario del sector administrativo de minas y energía. • En general se habla sobre generadores FNCER, inversión y gestión eficiente de la energía de FNCER, nuevos proyectos FNCER entre otras terminologías referentes a fuentes de generación renovable.
Ley 2099 de 2021	• Por medio de la cual se dictan disposiciones para la transición energética, la dinamización del mercado energético, la reactivación económica del país y se dictan otras disposiciones.

Otros documentos.	• Propuesta de Reglamento Técnico de Eficiencia Energética para viviendas de interés social (RETEVIS). [138] • Plan de acción sectorial para el sector vivienda y desarrollo territorial (PAS Vivienda), el cual es una estrategia colombiana de desarrollo bajo en carbono [139]. • Guía Técnica para ahorro de agua y energía adoptada mediante resolución 549 de 2015 [140]. • Propuesta de documento Conpes de edificaciones sostenibles [141].

Además, en la Tabla 3-2 se mencionan algunos casos de estudio referentes a ZEB con estudios realizados en Colombia.

Tabla 3-2. Algunos casos de estudio de ZEB en Colombia. **Fuente:** Elaboración propia.

Nombre	**Aportes y características**
Vivienda con energía neta cero pilotos virtuales del Artículo 6 del acuerdo de Paris [113].	• Se exploró la construcción de NZEB en la zona de clima cálido y húmedo de Cartagena, Colombia. • Se deduce que la introducción de NZEB en Colombia tiene el potencial de mejorar las prácticas de construcción, reducir el consumo de energía, lograr ahorros monetarios tanto para los residentes como para el gobierno colombiano, aumentar el acceso a la energía y la seguridad, mejorar la salud y el confort personal, así como reducir las emisiones. • No se encontraron proyectos NZEB existentes o previstos en Colombia y solo algunos ejemplos de NZEB en regiones tropicales y húmedas en otras partes del mundo. Sin apoyos extranjeros es inaccesible debido al subdesarrollo de los NZEB en Colombia. • Se deduce que los NZEB tienen aproximadamente un 15% de sobreprecio en comparación con los edificios estándar.
Edificio EAN LEGACY [142].	• Es un edificio de la Universidad EAN el cual fue diseñado e inspirado en la filosofía Cradle to Cradle®, que hace referencia al y ciclo de vida íntegramente verde y está relacionado con la economía circular. • El Ean Legacy es un proyecto registrado para la certificación LEED. “LEED® (por sus siglas en inglés, Leadership in Energy &

	Environmental Design). Este el sistema de certificación más utilizado en el mundo para el diseño, construcción, mantenimiento y operación de construcciones sostenibles. Al utilizar menos energía, los espacios certificados LEED ahorran dinero a las familias y empresarios, reducen las emisiones de carbono y contribuyen con ambientes saludables para el uso de residentes, trabajadores y la comunidad en general.”
Consideraciones energéticas de viviendas de interés social en Colombia según el concepto NZEB [143].	• En este trabajo se estudian las características y definiciones de los NZEB. En particular, en este trabajo se analizan los métodos de cálculo de saldos para cada concepto y metodología, teniendo en cuenta la interacción de la NZEB con la red energética, las emisiones producidas por consumo energético y la introducción del concepto de energía primaria como indicador de equilibrar. Los electrodomésticos de alta eficiencia energética son el principal interés de este trabajo debido a su importancia y nivel de uso en las regiones tropicales. Se describe cómo estos electrodomésticos pueden reducir el consumo de energía, así como su impacto en el rendimiento eléctrico siendo un beneficio significativo en Colombia. Es decir, si se pudieran aplicar masivamente en proyectos relacionados con Viviendas de Interés Social-VIS (viviendas sociales) a largo plazo.

Para la determinación del estado base del campus La Nubia se toma como referencia la guía de construcción sostenible para el ahorro de agua y energía en edificaciones reglamentado por las resoluciones 549 de 2015. De allí se define como tipo de clima de Manizales como frio (ya que está a 2.153 msnm y tiene una temperatura entre 13°C y 21°C), por otra parte, el confort térmico en edificios se da entre 21°C y 25°C.

De la guía también se toma como referencia la línea base de consumo de energía para centros educativos en climas fríos, el cual es de 40 kWh/m2-año como se muestra en la Tabla 3-3.

kWh/m²-año	Frío	Templado	Cálido seco	Cálido húmedo
Hoteles	96,1	151,3	132,5	217,8
Hospitales	249,6	108,3	344,1	344,1
Oficinas	81,2	132,3	318,2	221,3
Centros comerciales	403,8	187,8	187,8	231,5
Educativos	40,0	44,0	72,0	29,8
Vivienda no VIS	46,5	48,3	36,9	50,2
Vivienda VIS	44,6	44,0	34,6	49,3
Vivienda VIP	48,1	53,3	44,9	50,6

Tabla 3-3. Línea base de consumo de energía. **Fuente:** Guía de construcción sostenible para el ahorro de agua y energía en edificaciones [81].

En la guía se realizó un análisis de sensibilidad con diferentes parámetros de diseños activos y pasivos, con el objetivo de definir un porcentaje mínimo de ahorro de energía para diferentes tipos de edificaciones y climas, las medidas que se consideran se muestran en la Tabla 3-4.

Tabla 3-4. Medidas pasivas y activas para análisis de sensibilidad. **Fuente:** Guía de construcción sostenible para el ahorro de agua y energía en edificaciones [81].

Medida de diseño	Zona de acción	Medidas a tomar
Pasiva	Desde la arquitectura del edificio	• Relación Ventana / Pared • Sombreamiento Horizontal • Sombreamiento Vertical • Sombra Combinada • Valor U del Vidrio • Coeficiente de ganancia de calor del Vidrio • Valores del conjunto de acristalamiento • Valor U muro • Valor U cubierta • Reflectividad Pared • Reflectividad techo • Estanqueidad • Ventilación Natural

Activa	Iluminación	• Iluminación natural • Densidad de potencia de luz [LPD - W/m²] • Controles [sensores de ocupantes, Zonificación] • Controles iluminación exterior
Activa	Sistemas HVAC	• Economizadores de aire (W/m²) • Coeficiente de desempeño (COP) • Variadores de frecuencia (VSD) para torres de Enfriamiento • Sensores de Monóxido de Carbono (CO) para ventilación de estacionamiento vehicular • Sensores de dióxido de carbono (CO2) para suministro aire Fresco Esto es usado como instrumento para la medición del gas dióxido de carbono • Variadores de frecuencia (VSD) para Bombas • Recuperación de calor de aire de retorno • Ventilador VFD-UMA • Agua Caliente Solar
Activa	Sistemas de potencia eléctrica	• Eficiencias de Ascensores & Escaleras Mecánicas • Sub-medición de electricidad • Corrección de factor de potencia • Puntos cargue carros eléctricos

Después del análisis de sensibilidad, se describieron las medidas activas y pasivas recomendadas para los diferentes tipos de edificación y los diferentes tipos de clima analizados, para edificaciones educativas como el campus La Nubia y climas fríos como el de Manizales se tienen las siguientes recomendaciones activas y pasivas (Tabla 3-5).

Tabla 3-5. Medidas de diseño pasivas y activas recomendadas para centros educativos de clima frio. **Fuente:** Guía de construcción sostenible para el ahorro de agua y energía en edificaciones [81].

Medida de diseño	Zona de acción	Medidas a tomar
Pasiva	Desde la arquitectura del edificio	• Relación Ventana / Pared • Protección solar • Ventilación Natural
Activa	Iluminación	• Luz día y control de luz día • Iluminación de emergencia eficiente • Economizadores de aire • Coeficiente de desempeño (COP) • Control de iluminación exterior • Controles: sensores de ocupación • Corrección de factor de potencia

El porcentaje de ahorro que se definió en este documento para instituciones educativas en climas fríos es del 45%, como se muestra en la Tabla 3-6.

Tabla 3-6. Porcentajes mínimos de ahorro de energía. **Fuente:** Guía de construcción sostenible para el ahorro de agua y energía en edificaciones [81].

Energía	Porcentaje mínimo de ahorro			
Con respecto a la línea base	Frío	Templado	Cálido seco	Cálido húmedo
Hoteles	20	35	25	45
Hospitales	35	25	35	30
Oficinas	30	30	40	30
Centros comerciales	25	40	35	30
Educativos	45	40	40	35
Vivienda no VIS	25	25	25	45
Vivienda VIS	20	15	20	20
Vivienda VIP	15	15	20	15

De acuerdo con lo anterior, el consumo base en centros educativos para climas fríos es de 40 kWh/m2 – año, pero con la aplicación de medidas pasivas y activas exigidas por la resolución tuvieron que tener una disminución del 45%, por ello el consumo base LEB que se tomara como referencia para el caso de estudio se muestra en la ecuación (3).

$$Consumo\ base\ promedio = 40\ \frac{kWh}{m^2 * Año} \tag{1}$$

$$Consumo\ base\ LEB = 40\ \frac{kWh}{m^2 * Año} - \left(40\ \frac{kWh}{m^2 * Año} * 45\%\right) \tag{2}$$

$$Consumo\ base\ LEB = 22 \frac{kWh}{m^2 * Año} \tag{3}$$

Cabe aclarar que en esta tesis se asume que por medio de la resolución 549 se puede llegar a la clasificación LEB, debido a que sus porcentajes de ahorro son casi igual (45% - 50% respectivamente), por ello se modifica la Figura 2-1 añadiendo las acciones activas y pasivas que se proponen desde la guía de construcción sostenible para instituciones educativas de clima frio en Colombia (Tabla 3-5), como se muestra en la Figura 3-2.

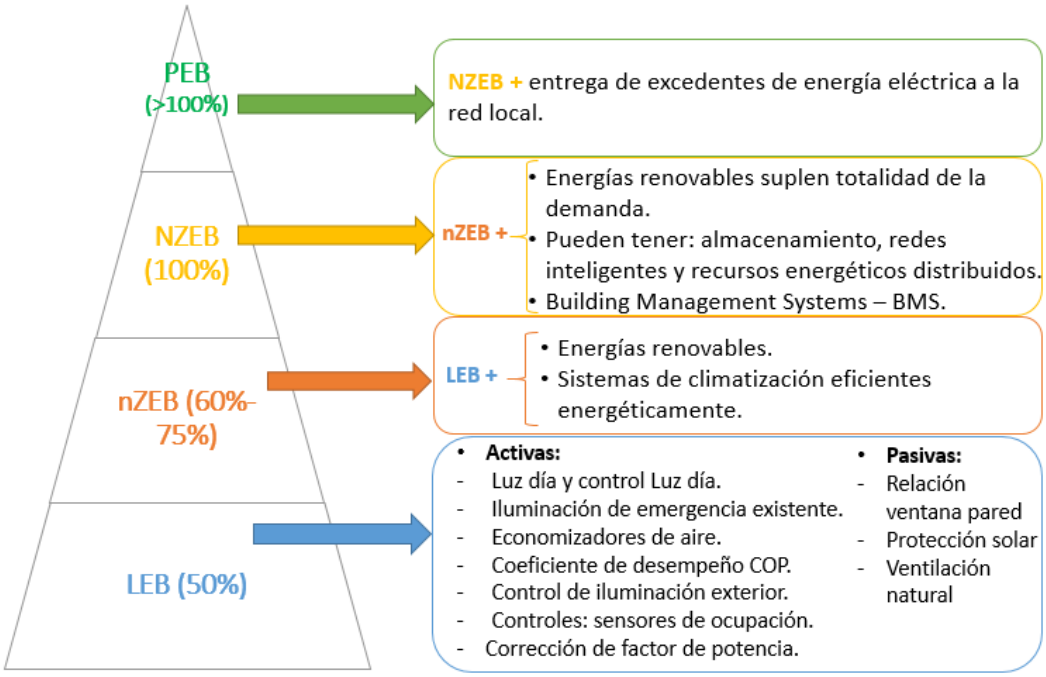


Figura 3-2. Medias de diseño pasivo y activo recomendadas para la clasificación ZEB en Colombia. **Fuente:** Elaboración propia.

En este caso de estudio se pretende alcanzar cada escenario de acuerdo a las acciones descritas en la Figura 3-2. Para el escenario LEB, lo primero que se hizo fue verificar los antecedentes con los que Colombia cuenta con respecto a edificaciones sustentables o sostenibles, determinando unos consumos base obtenidos de la guía de ahorro de energía y agua (fase 1 de metodología propuesta en Figura 3-1. Propuesta metodológica para la evaluación energética de un edificio LEB en Colombia. **Fuente:** Elaboración propia.). Luego, se elaboró un diagnóstico y caracterización de los bloques del campus la Nubia, con el fin de conocer el estado actual de los bloques, además de los equipos y sistemas con los que cuenta actualmente el campus. Lo anterior es necesario para conocer datos como longevidad de los bloques, posibilidades de los equipos y sistemas de comunicación y diseños pasivos o activos con los que cuenta cada bloque. Este proceso se muestra a continuación (fase 2 de metodología propuesta en Figura 3-1.)

3.1.2 Diagnóstico y caracterización de los bloques del campus La Nubia.

Estado del campus: levantamiento e información remanente

En [144] se describió el estado energético actual de las redes eléctricas, subestaciones, recursos energético distribuidos DERs, equipos de medida y comunicaciones. Esta tesis sirvió como punto de partida para el caso de estudio del presente trabajo.

El campus universitario la Nubia de la Universidad Nacional de Colombia está Ubicado en la ciudad de Manizales Caldas - Colombia Km 9 vía al Aeropuerto La Nubia.

Figura 3-3. Campus La Nubia. **Fuente:** Google Earth.

EL campus universitario tiene una capacidad instalada de 1697,5 kVA divido en 14 subestaciones, los edificios del campus contemplan actividades académicas, deportivas, administrativas y de bienestar universitario.

También se destacan DERs (recursos energéticos distribuidos) y equipos de medida con los que cuenta el campus; existen 3 equipos DERs de generación eléctrica y 1 de demanda ubicados en el campus, además también existen 5 equipos de medida ubicados en algunas subestaciones y tableros de distribución. Estos recursos se muestran en la Tabla 3-7.

Tabla 3-7. DERs y equipos de medida Campus La Nubia. **Fuente:** Environmental Energy and Education Policy – E3P [144].

Recurso y ubicación	Función	Oportunidades
Sistema solar fotovoltaico 10 kWp (Bloque W campus la Nubia).	DER de generación renovable.	Generación alternativa, control de frecuencia, control de tensión, respaldo energético.

Grupo electrógeno 300 kW (bloque L campus la Nubia).	DER de generación convencional utilizado como respaldo eléctrico.	Generación, control de frecuencia, control de tensión, respaldo energético, seguridad y continuidad en el suministro
Grupo electrógeno 115 kW (biblioteca campus la Nubia).	DER de generación convencional utilizado como respaldo eléctrico.	Generación, control de frecuencia, control de tensión, respaldo energético, seguridad y continuidad en el suministro
Reconectador principal.	DER de demanda	Monitoreo control constante de la demanda
Analizador de redes Lovato DMG 900 bloque W	Equipo de medida	Tomar medidas de energía, potencia y calidad de señal en máquinas eléctricas, subsistemas aislados, o totalidad de la red.
Analizador de redes Lovato DMG 900 Bloque S2	Equipo de medida	Tomar medidas de energía, potencia y calidad de señal en máquinas eléctricas, subsistemas aislados, o totalidad de la red.
Medidor de Energía ION 8600	Equipo de medida	Medición de energía, monitoreo eléctrico.
SonOFF S31 (puesto de trabajo secretaria)	Equipo de medida	El enchufe inteligente para controlar los dispositivos conectados, de forma remota desde cualquier lugar.
SonOFF POW (circuito ramal de iluminación bloque Q)	Equipo de medida	El enchufe inteligente para controlar los dispositivos conectados, de forma remota desde cualquier lugar.

Comunicaciones

En la matriz de comunicaciones del campus la Nubia, se encuentran una diversidad de protocolos que comunican los DERs y las instalaciones eléctricas. Entre ellos se encuentran Devicenet, TCP/IP, Modbus, Serial RS 485, Serial RS 232, Can Open. Es importante resaltar que no todas las subestaciones ni todos los equipos están comunicados. Actualmente el campus la Nubia se encuentra en un nivel primario de comunicaciones, porque si bien se tienen los DERs y los dispositivos de comunicación, y

estos tienen sus respectivas tarjetas de adquisición de datos, no se encuentran conectados a servidores que puedan direccionar esta información adquirida por los actuadores, sensores y medidores de los DERs y las instalaciones. Es importante considerar que las gestiones de los DERs en un campus universitario brindan las posibilidades de crear un laboratorio inicialmente con fines netamente académicos y que posteriormente de acuerdo a las tecnologías de los DERs, y su tipo de comunicación puedan llegar a ser una base sólida para la investigación en aras de potencializar la incorporación de estos recursos.

Caracterización y diagnóstico de los bloques del campus La Nubia.

El campus La Nubia cuenta con 14 edificaciones que, a pesar de ser parte de una institución educativa en sí, presentan diferentes usos de la energía y fueron construidos en diferentes épocas. A continuación, se muestra una breve reseña de los bloques.

Bloques antiguos

Los bloques más antiguos del campus son el X, Y, O, W (antes de ser rediseñado), V (rediseñado en bloque S2) y S (después sería bloque S1). Estos bloques al ser los más longevos del campus no tienen desde su diseño y construcción consideraciones bioclimáticas pasivas ni las mejores tecnologías activas. El bloque X se desempeña en labores de centro de idiomas y desarrollo de software y el bloque Y corresponde a labores administrativas y de salas de micros y el bloque O tiene aulas y laboratorios de física.

Los bloques S y W han sido demolidos completamente y sobre ellos se han construido los nuevos bloques S1 y W respectivamente. El bloque V (llamado diente sierra) ha sido renovado y rehabilitado desde toda su arquitectura y desde sus medidas activas y pasivas convirtiéndose en el nuevo bloque S2.

Bloques intermedios

Después se construirían con diseños tecnológicos y arquitectónicos más modernos los bloques Z, T, U, Q, P, R y portería.

El bloque Z corresponde a las labores de bienestar universitario en donde están todos los servicios complementarios para estudiantes docentes y administrativos como gimnasio, restaurante, oficinas, servicios médicos, entre otros. En el bloque T se trabajan labores

investigativas encaminadas a la biotecnología y muy cerca se encuentra el bloque U en el cual está situada la biblioteca del campus la Nubia.

Los bloques P, Q y R en particular son especiales puesto que fueron diseñados conjuntamente y todas sus áreas de circulación se encuentran conectadas como si se tratase de una edificación unificada. El diseño de estos bloques tiene en cuenta la ubicación del sol evitando que la iluminación natural interrumpa las labores diarias de los bloques, además, para el diseño de estos bloques se tuvo en cuenta que la altura de los edificios tenía que ser menor o igual a la pista de aterrizaje del aeropuerto la Nubia, el cual se encuentra ubicado al lado del campus, por ello estos bloques no superan los 3 pisos de altura. Estos bloques fueron galardonados con el premio caldense de arquitectura dentro de la categoría de arquitectura metálica [145]. A pesar de que estos bloques se encuentran en un nivel intermedio de longevidad en el campus presentan algunos problemas de diseño y de confort desde la parte activa y pasiva, como por ejemplo sobrecalentamiento de los techos del bloque P que generan calor interno en las aulas o utilización de luminarias ineficientes energéticamente en los 3 bloques. El bloque P está conformado por aulas de clase y salas de micro; el bloque Q contiene auditorios, oficinas administrativas y aulas de talleres y el bloque R funciona como auditorio principal del campus La Nubia.

Bloques recientes (nuevos o renovados)

Por último, los edificios construidos más recientemente son el L, W (rediseñado), S1 (rediseñado), S2 (renovado). Estos bloques son el resultado del desarrollo de los planes maestros de ordenamiento territorial y desarrollo físico: Plan maestro campus La Nubia 2009 y Plan maestro campus Palo grande 2010 de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, donde los nuevos bloques sé caracterizan por ser estructuras participativas, innovadoras y vanguardistas para el escenario académico - administrativo. El Plan Maestro del Campus La Nubia empezó a tomar forma en diciembre del 2013 con la construcción del Bloque L o de laboratorios, inversión: $14.200 millones. El proceso siguió en el 2015 con el Edificio W, inversión: $4.100 millones. Por último la consolidación de los planes se dio en 2019 con los bloques S1 y S2, inversión: $31 mil millones [146].

El bloque L fue inaugurado en 2013 y cuenta con un área construida de $7.226\mathrm{m}^2$, tiene parámetros de diseño de última tecnología y bioclimáticos de confort. Este bloque alberga

aulas, fotocopiadora y 27 laboratorios de ingeniería Química [147]. Este bloque fue construido y diseñado desde cero puesto que en su lugar no había ninguna edificación existente. Este bloque cuenta con un DER de generación Diésel en 300kW que se utiliza de respaldo eléctrico en el campus.

El bloque W nuevo fue construido sobre los restos del antiguo Bloque W, El edificio conserva y rehabilita un auditorio existente sustituyendo las preexistencias caducas y, se complementa con obra nueva respetando los paramentos y alturas intrínsecas definidas por el plan maestro para este lugar del campus [148], posteriormente sería inaugurado en 2015 y cuenta con un áreas construida de 8.452m^2. Este bloque alberga labores correspondientes a la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, cuenta con 30 laboratorios, 57 oficinas, 16 salas, 5 aulas y 1 auditorio. Este tiene con un sistema solar fotovoltaico de 10kWh (40 paneles de 250W) y un sistema de almacenamiento de aguas lluvias para servicios sanitarios [149]. También fue diseñado teniendo en cuenta el confort a partir de ventilación e iluminación natural de sus espacios, con bajo uso energético. El bloque W cuenta con modernas redes eléctricas, electrónicas, voz, datos, iluminación, redes hidrosanitarias, contra incendios y otras [148].

Los bloques S1 y S2 fueron inaugurados en 2019 y entre los dos cuentan con un área construida de 7.431m^2 (2.452 m^2 el S1 y 5000m^2 el S2). Estos bloques tienen como principales usos la investigación, extensión y academia [150]. En la construcción de ambos bloques se utilizaron materiales de alta durabilidad, sostenibilidad y uso eficiente del agua.

El bloque S1 cuenta con siete laboratorios, un auditorio para 150 personas y dos salas de simulación computacional; en el segundo se tienen 100 puestos de trabajo para estudiantes de posgrado, maestría y doctorado, y en el tercero está el área administrativa [146]. Este bloque fue construido sobre el antiguo bloque S, el cual fue demolido en su totalidad. Para el diseño del S1 se realizó un estudio hecho por la Academia Colombiana de Arquitectura y Diseño el cual trata sobre la entrega de estudios bioclimáticos, de eficiencia energética, de ergonomía y de sostenibilidad del S1 [151]; este estudio brindo recomendaciones y dictamino cumplimientos o no de varios ítems, en general se determinó en el estudio que el campus cumple con aspectos de confort bioclimáticos.

El bloque S2 está dividido en dos secciones: “en el lado A funciona el Laboratorio de Ingeniería Civil, el de Estructuras Pesadas y las oficinas de profesores y posgrados, y en el lado B están los laboratorios de Eléctrica y Electrónica [146]. Para la construcción de

este bloque se aprovechó la anterior estructura que allí residía (Bloque V - diente sierra), por ende, el nuevo bloque S2 es el resultado de un reacondicionamiento, rediseño y reconstrucción de un bloque antiguo (renovación de edificio existente).

La Tabla 3-8 muestra el resumen del estado actual de los bloques en 3 clasificaciones (antiguo en rojo, intermedio en amarillo y renovado o nuevo en verde) y sus características, además de algunos datos de interés.

Tabla 3-8. Estado actual de los bloques del campus La Nubia. **Fuente:** Elaboración propia.

Bloque	Actualidad	Características
Portería	Intermedio	• Portería
L	Nuevo	• Bloque de aulas y laboratorios (27) de ingeniería Química [147], también cuenta con fotocopiadora. • Grupo electrógeno de 300kVA. • Confort interno – diseño bioclimático. • Eficiencia energética en arquitectura y redes eléctricas. • Inaugurado en 2013.
O	Antiguo	• Bloque de aulas y laboratorios de física. • Diseños eléctricos y arquitectónicos antiguos. • Inaugurado en 2003.
P	Intermedio	• Bloque de aulas y salas de simulación, cuenta con fotocopiadora. • Diseños arquitectónicos y eléctricos actuales, pero con déficits. • Inaugurado en 2003.
Q	Intermedio	• Bloque de oficinas administrativas, auditorios, talleres y aulas. (Incluye cafetería). • Diseños arquitectónicos y eléctricos actuales, pero con déficits. • Inaugurado en 2003.
R	Intermedio	• Auditorio. • Diseños arquitectónicos y eléctricos actuales, pero con déficits. • Inaugurado en 2003.
S1	Nuevo**	• Laboratorios, auditorios, salas de cómputo, área administrativa, etc. • Confort interno – diseño bioclimático. • Eficiencia energética en arquitectura y redes eléctricas.

		• Inauguración en 2019.
S2	Renovado	• Laboratorio de ingeniería civil, oficinas, laboratorios de ingeniería eléctrica y electrónica. • Confort interno – diseño bioclimático. • Eficiencia energética en arquitectura y redes eléctricas. • Inauguración en 2019.
T	Intermedio	• Bloque investigativo (Planta piloto Biotecnología). • Diseños arquitectónicos y eléctricos actuales pero con déficits.
U	Intermedio	• Biblioteca, salas de micro y auditorios (cafetería incluida). • Diseños arquitectónicos y eléctricos actuales, pero con déficits. • Grupo electrógeno de 115kVA. • Inaugurado en 2006.
W	Nuevo**	• Bloque de ciencias exactas y naturales, cuenta con 30 laboratorios, 57 oficinas, 16 salas, 5 aulas y un auditorio. [149] • Confort interno – diseño bioclimático. • Eficiencia energética en arquitectura y redes eléctricas. • Sistemas solares fotovoltaico de 10kVA. • Sistema de almacenamiento de aguas lluvias para servicios sanitarios. • Grupo electrógeno de 30kVA (para respaldo de laboratorios) • Inaugurado en 2015
X	Antiguo	• Bloque de salas de micros (diseño de software, ALEX, centro de idiomas) • Diseños arquitectónicos y eléctricos actuales pero con déficits.
Y	Antiguo	• Oficinas administrativas, salas de micros, fotocopiadora. • Diseños eléctricos y arquitectónicos antiguos.
Z	Intermedio	• Bienestar universitario (oficinas, gimnasio, enfermería, cafetería, etc.) • Diseños arquitectónicos y eléctricos actuales pero con déficits.

3.1.3 Estimación de cargas para cada bloque

Como se mencionó anteriormente, existen edificios que son antiguos, además de ineficientes energéticamente, por eso los bloques antiguos (O, X y Y) y los intermedios (Portería, P, Q, R, T, U y Z) a priori no cumplen con los porcentajes de ahorro planteados en la resolución 549 de 2015. Por otra parte, los edificios nuevos (L, S1, S2 y W) al ser los

edificios más recientes que se han construido en el campus cuentan con estándares de confort bioclimático y de eficiencia energética que van de la mano con la resolución 549, por lo que se puede considerar que cumplen con esta; para ratificar las afirmaciones hechas anteriormente se analizó el consumo de energía de cada bloque para observar que tan cerca están del consumo base promedio y el consumo base LEB.

Para determinar el consumo de los bloques se tomó como referencia la carga instalada de cada bloque y un perfil de demanda característico de una institución educativa. Las cargas instaladas en estos bloques antiguos e intermedios se realizaron por medio de levantamientos realizados por el grupo E3P en trabajos de clase o tesis anteriores [152]; las cargas instaladas de los bloques nuevos se estimaron de acuerdo a la capacidad de transformación de los transformadores de los bloques nuevos que se pueden encontrar en los planos de diagramas unifilares del campus la Nubia, con el supuesto que están sobredimensionados entre un 150% a un 300%, como se puede observar en la Tabla 3-9. Para determinar la carga demandada en kW se asume que los bloques tienen un factor de potencia de 0,95.

Tabla 3-9. Carga instalada y distribución de carga de los bloques antiguos e intermedios del campus La Nubia. **Fuente:** Environmental Energy and Education Policy - E3P y [153]

Bloque	**Capacidad de transformación (kVA)**	**Carga instalada (kVA)**	**Caracterización de carga o trasformador (kVA)**	**Carga demandada (kW) con FP:0,95**
L	400	Carga instalada estimada : 170	Capacidad de transformación: • 1 transformador de 400	161,5
O	El mismo del P	20	• Iluminación: 8 • Equipos de oficina: 3 • Tomas: 5 • Equipos de laboratorio: 4	19
P	112,5	83	• Iluminación: 33 • Equipos de oficina: 30	78,85

			• Tomas: 20	
Q	112,5	115	• Iluminación: 71 • Equipos de oficina: 29 • Tomas:15	109,3
R	El mismo del Q	30	• Iluminación: 15 • Equipos de oficina: 10 • Tomas: 5	28,5
S1	105	Carga instalada estimada: 60	Capacidad de transformación: • 1 transformador de 75 • 1 transformador de 30 (carga regulada)	57
S2	217,5	Carga instalada estimada : 120	Capacidad de transformación: • 1 transformador de 112,5 • 1 transformador de 30 (carga regulada) • 1 transformador de 75	114
T	112,5	73	• Iluminación: 19 • Equipos de oficina: 7 • Tomas: 17 • Equipos de laboratorio (destilador, horno, rota vapor, incubadora): 30	69,35
U	112,5	112,5	• Iluminación: 60 • Equipos de oficina: 20 • Tomas: 40 • Motores (bombas, ascensor, aire acondicionado): 32	106,8
W	150	100	Capacidad de transformación: • 1 transformador de 150	95

X	150 (para X y Y)	90	• Iluminación: 20 • Equipos de oficina: 60 • Tomas: 10	85,5
Y	150 (para X y Y)	40	• Iluminación: 10 • Equipos de oficina: 20 • Tomas: 10	38
Z	112,5	100	• Iluminación: 40 • Equipos de oficina: 30 • Tomas: 30	95

El perfil de demanda característico de una institución educativa, proporcionado por el grupo de investigación E3P se muestra en la Figura 3-4.

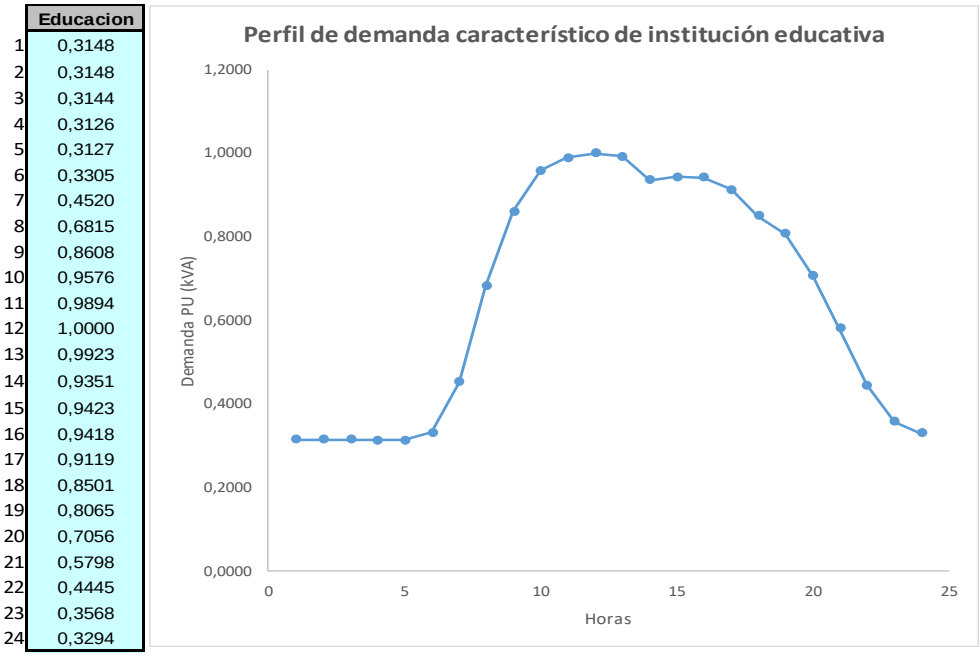


Figura 3-4. Perfil de demanda característico de institución educativa. **Fuente:** Environmental Energy and Education Policy – E3P.

Al multiplicar el perfil de demanda característico de una institución educativa por la carga demandada de los bloques se obtuvo el consumo por horas del día para cada bloque, como se muestra en la Tabla 3-10 y en la Figura 3-5.

Tabla 3-10. Perfil de demanda de los bloques antiguos e intermedios. **Fuente:** Elaboración propia.

Bloques	L	O	P	Q	R	S1	S2	T	U	W	X	Y	Z	*Total cada hora en kWh*
Hora/carga(kW)	161,5	19	78,85	109,25	28,5	57	114	69,35	106,88	95	85,5	38	95	
1	50,8	6,0	24,8	34,4	9,0	17,9	35,9	21,8	33,6	29,9	26,9	12,0	29,9	***282,1***
2	50,8	6,0	24,8	34,4	9,0	17,9	35,9	21,8	33,6	29,9	26,9	12,0	29,9	***282,2***
3	50,8	6,0	24,8	34,4	9,0	17,9	35,8	21,8	33,6	29,9	26,9	11,9	29,9	***281,8***
4	50,5	5,9	24,6	34,2	8,9	17,8	35,6	21,7	33,4	29,7	26,7	11,9	29,7	***280,2***
5	50,5	5,9	24,7	34,2	8,9	17,8	35,7	21,7	33,4	29,7	26,7	11,9	29,7	***280,3***
6	53,4	6,3	26,1	36,1	9,4	18,8	37,7	22,9	35,3	31,4	28,3	12,6	31,4	***296,3***
7	73,0	8,6	35,6	49,4	12,9	25,8	51,5	31,3	48,3	42,9	38,6	17,2	42,9	***405,1***
8	110,1	12,9	53,7	74,4	19,4	38,8	77,7	47,3	72,8	64,7	58,3	25,9	64,7	***610,8***
9	139,0	16,4	67,9	94,0	24,5	49,1	98,1	59,7	92,0	81,8	73,6	32,7	81,8	***771,6***
10	154,7	18,2	75,5	104,6	27,3	54,6	109,2	66,4	102,3	91,0	81,9	36,4	91,0	***858,3***
11	159,8	18,8	78,0	108,1	28,2	56,4	112,8	68,6	105,7	94,0	84,6	37,6	94,0	***886,8***
12	161,5	19,0	78,9	109,3	28,5	57,0	114,0	69,4	106,9	95,0	85,5	38,0	95,0	***896,3***
13	160,3	18,9	78,2	108,4	28,3	56,6	113,1	68,8	106,1	94,3	84,8	37,7	94,3	***889,5***
14	151,0	17,8	73,7	102,2	26,7	53,3	106,6	64,8	99,9	88,8	80,0	35,5	88,8	***838,1***
15	152,2	17,9	74,3	102,9	26,9	53,7	107,4	65,4	100,7	89,5	80,6	35,8	89,5	***844,6***
16	152,1	17,9	74,3	102,9	26,8	53,7	107,4	65,3	100,7	89,5	80,5	35,8	89,5	***844,1***
17	147,3	17,3	71,9	99,6	26,0	52,0	104,0	63,2	97,5	86,6	78,0	34,7	86,6	***817,4***
18	137,3	16,2	67,0	92,9	24,2	48,5	96,9	59,0	90,9	80,8	72,7	32,3	80,8	***762,0***
19	130,2	15,3	63,6	88,1	23,0	46,0	91,9	55,9	86,2	76,6	69,0	30,6	76,6	***722,9***
20	114,0	13,4	55,6	77,1	20,1	40,2	80,4	48,9	75,4	67,0	60,3	26,8	67,0	***632,4***
21	93,6	11,0	45,7	63,3	16,5	33,0	66,1	40,2	62,0	55,1	49,6	22,0	55,1	***519,6***
22	71,8	8,4	35,0	48,6	12,7	25,3	50,7	30,8	47,5	42,2	38,0	16,9	42,2	***398,4***
23	57,6	6,8	28,1	39,0	10,2	20,3	40,7	24,7	38,1	33,9	30,5	13,6	33,9	***319,8***
24	53,2	6,3	26,0	36,0	9,4	18,8	37,6	22,8	35,2	31,3	28,2	12,5	31,3	***295,3***
Total por bloque al dia en kWh	***2525,4***	***297,1***	***1233,0***	***1708,4***	***445,7***	***891,3***	***1782,7***	***1084,5***	***1671,2***	***1485,5***	***1337,0***	***594,2***	***1485,5***	**14016,1**

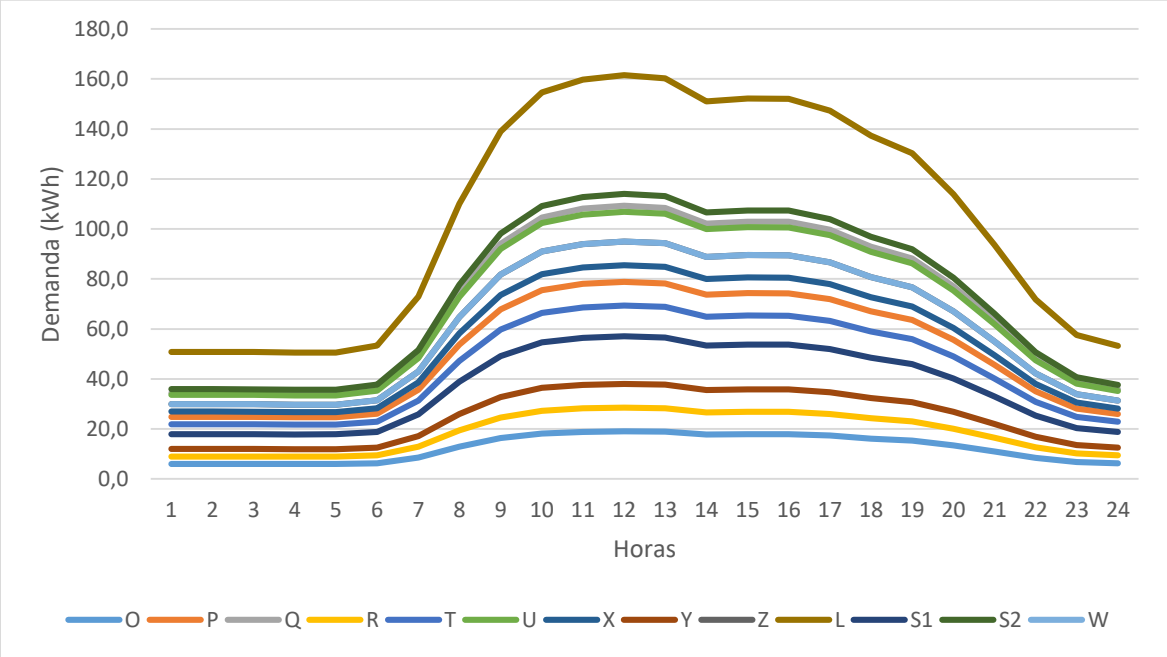


Figura 3-5. Demanda diaria de los bloques del campus La Nubia. **Fuente:** Elaboración propia.

El consumo diario y anual de todos los bloques del campus la Nubia de acuerdo con el proceso anteriormente realizado se muestra en la Tabla 3-11. Las áreas construidas de los bloques se tomaron de las plataformas informáticas de la Universidad Nacional y mediciones hechas en Google Earth.

Tabla 3-11. Consumo diario por bloques de campus la Nubia. **Fuente:** Elaboración propia.

Bloque	Área (m2)	Consumo diario (kWh/día)	(kWh/m2*día)	(kWh/m2*año)
L	7226	2525,43	0,35	127,56
O	580	297,11	0,51	186,97
P	3555	1233,01	0,35	126,60
Q	3700	1708,38	0,46	168,53
R	1000	445,66	0,45	162,67
S1	2452	891,33	0,36	132,68
S2	5000	1782,66	0,36	130,13
T	550	1084,45	1,97	719,68
U	3900	1671,24	0,43	156,41
W	5200	1485,55	0,29	104,27
X	730	1336,99	1,83	668,50
Y	1300	594,22	0,46	166,84
Z	2800	1485,55	0,53	193,65
TOTAL	**37993**	**16541,58**	**8,34**	**3044,50**

La comparación entre área construida y consumo diario de los bloques se muestra en la Figura 3-6.

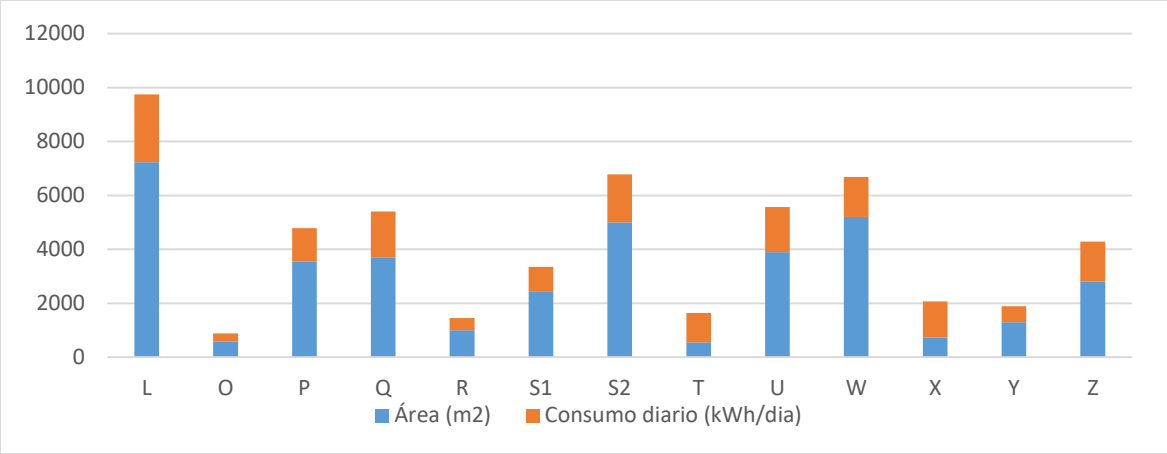


Figura 3-6. Área construida vs Consumo diario de los bloques del campus La Nubia.
Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la Tabla 3-11 y Figura 3-6, los consumos en kWh/m^2 al año calculados están por encima del consumo base promedio (40 kWh/m^2.año) y consumo base LEB (22 kWh/m^2.año) que dicta la resolución 549, esto se debe a que no se cuenta con datos actualizados de energía consumida de ninguno de los bloques del campus la Nubia si no que se hace el cálculo a partir de la capacidad instalada de cada bloque (o capacidad de transformación del transformador) y de un perfil de carga característico de una institución educativa, por lo que los resultados obtenidos deben de tener otras consideraciones para acercarse a la realidad y a la resolución. Por lo dicho anteriormente, se decide en esta tesis filtrar el análisis exclusivamente para los bloques que realmente realizan labores educativas, estos bloques son el L, S1, S2, W, P y Q. Los demás bloques se descartan debido a que, a pesar de estar ubicados dentro en una institución educativa, no realizan labores académicas si no que se dedican a labores complementarias y esto dificulta la comparación de los bloques con las bases que ofrecen la resolución 549 y la guía de construcción sostenible.

Ahora bien, para determinar el estado actual de los bloques del campus y compararlos con el consumo base promedio y el consumo base LEB se aplicaron factores de corrección al consumo anteriormente calculados, ya que, el perfil de carga escogido para los cálculos es muy cercano a la realidad, pero no tiene en cuenta las horas de funcionamiento ni los meses del año en los que la universidad está realmente en operación. Normalmente en un año la universidad está en su pico de funcionamiento 8 de los 12 meses del año, debido a que cada semestre académico dura 4 meses. Por otra parte, normalmente la universidad

en un día se encuentra ocupada 14 de las 24 horas del día (de 6 am a 8 pm), los factores de corrección se muestran en las ecuaciones (4) y (5).

$$Factor\ de\ correcion\ anual = \frac{8\ meses}{12\ meses} = 0{,}67 \tag{4}$$

$$Factor\ de\ corrección\ por\ horas = \frac{14\ horas}{24\ horas} = 0{,}58 \tag{5}$$

Se aplicaron también factores de corrección para los edificios nuevos de una reducción del 45% en el consumo calculado anteriormente para cada uno de los bloques nuevos, ya que, en esta tesis se supone que estas edificaciones al tener condiciones bioclimáticas y de eficiencia energética desde su diseño, van de la mano con las exigencias de la resolución 549 de 2015, la cual plantea ahorros del 45% en instituciones educativas.

$$Factor\ de\ corrección\ bloques\ nuevos = consumo\ calculado - (consumo\ calculado * 0{,}45) \tag{6}$$

Al aplicar los factores de corrección a los resultados obtenidos en la Tabla 3-10 para los bloques escogidos se tienen los datos obtenidos en la Tabla 3-12. En esta tabla se dejó el consumo de energía de cada bloque en kWh/m^2 año para compararlo con el consumo base promedio y el consumo base LEB.

Tabla 3-12. Consumos por bloques filtrados con factores de corrección. **Fuente:** Elaboración propia.

Bloques	**L**	**P**	**Q**	**S1**	**S2**	**W**	***Total kWh***
Área m^2	7226	3555	3700	2452	5000	5200	
Hora/carga(kWh)	161,5	78,85	109,25	57	114	95	
1	19,8	9,6	13,4	7,0	13,9	11,6	***55,5***
2	19,8	9,6	13,4	7,0	13,9	11,6	***55,6***
3	19,7	9,6	13,3	7,0	13,9	11,6	***55,5***
4	19,6	9,6	13,3	6,9	13,8	11,5	***55,2***
5	19,6	9,6	13,3	6,9	13,9	11,5	***55,2***
6	20,7	10,1	14,0	7,3	14,6	12,2	***58,3***

7	28,4	13,8	19,2	10,0	20,0	16,7	***79,8***
8	42,8	20,9	28,9	15,1	30,2	25,2	***120,3***
9	54,0	26,4	36,5	19,1	38,1	31,8	***151,9***
10	60,1	29,3	40,7	21,2	42,4	35,4	***169,0***
11	62,1	30,3	42,0	21,9	43,8	36,5	***174,6***
12	62,8	30,6	42,5	22,2	44,3	36,9	***176,5***
13	62,3	30,4	42,1	22,0	44,0	36,6	***175,1***
14	58,7	28,7	39,7	20,7	41,4	34,5	***165,0***
15	59,1	28,9	40,0	20,9	41,7	34,8	***166,3***
16	59,1	28,9	40,0	20,9	41,7	34,8	***166,2***
17	57,2	27,9	38,7	20,2	40,4	33,7	***160,9***
18	53,4	26,0	36,1	18,8	37,7	31,4	***150,0***
19	50,6	24,7	34,2	17,9	35,7	29,8	***142,3***
20	44,3	21,6	30,0	15,6	31,3	26,0	***124,5***
21	36,4	17,8	24,6	12,8	25,7	21,4	***102,3***
22	27,9	13,6	18,9	9,8	19,7	16,4	***78,4***
23	22,4	10,9	15,1	7,9	15,8	13,2	***63,0***
24	20,7	10,1	14,0	7,3	14,6	12,2	***58,1***
Total por bloque al día en kWh	*981,4*	*479,1*	*663,9*	*346,4*	*692,7*	*577,3*	*3740,8*
*Consumo base bloques kWh/(m^2*Año)*	*49,6*	*49,2*	*65,5*	*51,6*	*50,6*	*40,5*	*306,9*
Total por bloque en kWh/(m^2*Año) con nuevos LEB	***27,3***	***49,2***	***65,5***	***28,4***	***27,8***	***22,3***	***220,4***

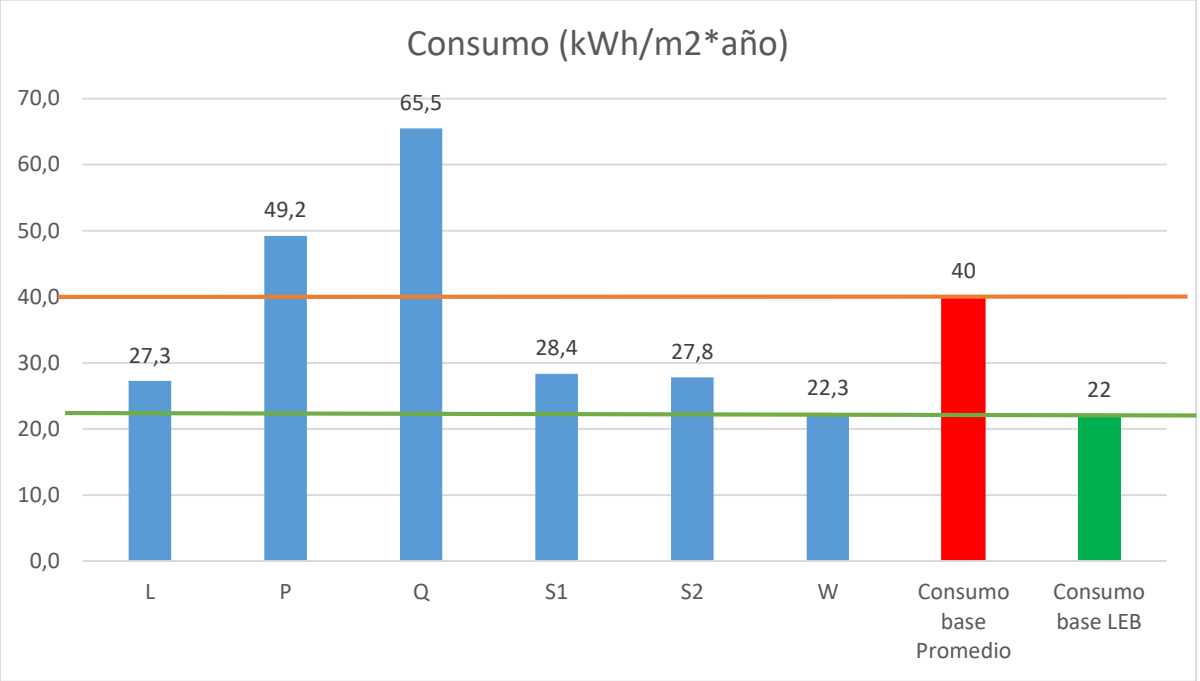


Figura 3-7. Estado de los bloques del campus la Nubia con respecto al consumo base promedio y consumo base LEB en (kWh/m2*año) aplicando factores de corrección.
Fuente: Elaboración propia.

Nota: Los datos de consumo subrayados en azul en la Tabla 3-12 (consumo base bloques en kWh/ (m^2. año)) son el consumo base definido para los bloques escogidos del campus la Nubia, a partir de estos consumos se determinaron los porcentajes de ahorro que se plantean en cada escenario de ZEB.

Como se puede observar en la Figura 3-7, los consumos de los bloques nuevos (L, S1, S2 y W) son muy cercanos al consumo base LEB debido a que tienen consideraciones de diseño activo y pasivo desde su diseño, por lo que se pude decir que los bloques nuevos son edificios de energía ultra baja LEB. Por el contrario, los bloques intermedios (P y Q) están por encima del consumo promedio que establece la guía de construcción sostenible debido a que son estructuras ineficientes energéticamente.

3.1.4 Recomendaciones futuras

Aplicación de medidas activas y pasivas

Debido a que los bloques intermedios P y Q están por encima del consumo base LEB se les deben de realizar las estrategias de disminución en el consumo de energía descritas en la Tabla 3-5.

Suponiendo que los dos bloques intermedios realizan las acciones de diseños pasivos y activos como las descritas en la Tabla 3-5 y se logra un ahorro del 50% en su consumo calculado (como lo dictamina el estándar LEB), los nuevos consumos para el bloque P y Q se describen en la Tabla 3-13 y Figura 3-8.

Tabla 3-13. Consumos por bloques filtrados con factores de corrección cumpliendo con los estándares LEB. **Fuente:** Elaboración propia.

Bloques	L	P	Q	S1	S2	W	Total
Area m^2	7226	3555	3700	2452	5000	5200	27133,0
Carga(kWh)	162	79	109	57	114	95	615,6
Consumo base bloques kWh/(m^2*Año)	49,6	49,2	65,5	51,6	50,6	40,5	306,9
Total por bloque en kWh/(m^2*Año) con nuevos e intermedios LEB	27,3	24,6	32,7	28,4	27,8	22,3	163,1

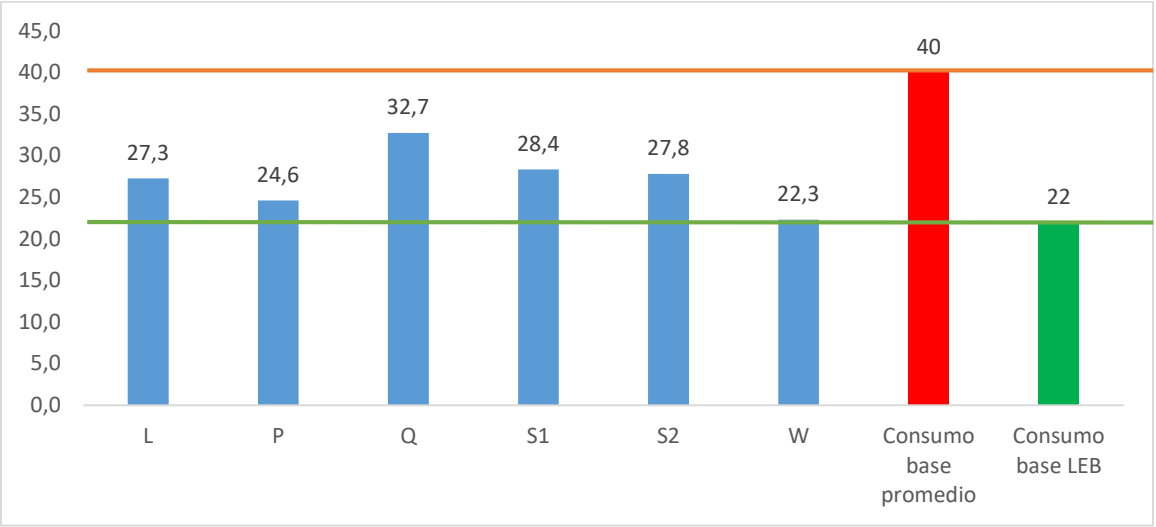


Figura 3-8. Consumos de bloques cumpliendo estándares LEB del campus la Nubia entre la brecha del consumo base promedio y consumo base LEB (kWh/m2*año).
Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la Figura 3-8 todos los bloques entran en la brecha entre el consumo base promedio y el consumo base LEB, siendo muy cercanos al consumo base LEB excepto el bloque Q, esto se debe a que este bloque tiene gran cantidad de carga instalada en un área construida reducida.

Sistemas de Gestión de Energía – SGEn

Para disminuir aún más los consumos e igualar la línea de consumo LEB se puede hacer uso de los SGEn por medio de programas se concientización de los usuarios y/o renovación tecnológica. Luego los consumos estimados con los programas SGEn son los que se deben obtener para que los bloques sean considerados LEB.

Es importante idear desde el principio algunas acciones en cuanto a sistemas de gestión de energía – SGEn. Estos SGEn no hacen parte del objetivo de la presente tesis, sin embargo se considera necesario nombrar el ciclo PHVA (Planear – Hacer – Verificar – Actuar) planteado desde la ISO 50001 para lograr reducciones en el consumo eléctrico de las edificaciones, en este caso desde el campus la Nubia [154].

En la primera etapa (planeación), se contemplaron el diagnóstico, recolección de información (levantamiento) y caracterización del estado actual de las instalaciones eléctricas y de las redes de comunicación, los cuales se realizaron en la presente sección. Adicionalmente, en la planeación se identificaron los USE (Usos Significativos de la Energía) de cada bloque del campus y se estableció una línea base (consumo base del campus) y cuatro (4) líneas meta, que van de acuerdo con el nivel de ZEB de cada escenario propuesto [144].

Para lograr un campus LEB también es pertinente analizar la renovación tecnológica de los elementos activos del campus (al igual que de equipos y maquinas) además de la implementación de fuentes de generación renovable y desarrollar programas de concientización y ahorro energético dirigido a la población estudiantil, administrativa y docentes que habitan el campus [128], [155]. Por otra parte, los usuarios o personas encargadas de la toma de decisiones del edificio pueden idear o programar auditorías internas por medio de las SGEn que puedan generar acciones de aumento de la eficiencia energética y disminuciones en la demanda eléctrica del edificio.

3.2 Nearly Zero Energy Buildings – nZEB

A partir de considerar los bloques filtrados del campus LEB (de acuerdo a las exigencias de la resolución 549), el siguiente paso a corto-mediano plazo es la toma de decisiones y medidas necesarias para alcanzar el estándar nZEB. Para ello se dimensionó una sostenibilidad y alimentación de la demanda del campus por medio de fuentes renovables, la cual en este caso se hizo por medio de la implementación de generación solar fotovoltaica. Además, se hizo un análisis para la ubicación óptima de los arreglos solares fotovoltaicos. Luego de esto se, determinó el perfil de demanda en condiciones de operación para que el campus se considere nZEB. A continuación, se muestra el proceso para que el campus La Nubia alcance un estándar nZEB.

3.2.1 Sostenibilidad desde los DERs (corto plazo)

Dimensionamiento de sistemas solares fotovoltaicos nZEB

En el anterior ítem se justificó el por qué el campus la Nubia puede ser considerado un LEB (desde los bloques nuevos) y se recomendaron acciones necesarias para que los bloques antiguos e intermedios sean más eficientes energéticamente con la implementación de acciones activas y pasivas de diseño recomendadas por la guía de desarrollo sostenible. Partiendo de la suposición de que el campus se pueda considerar un LEB (50% de ahorro) se desea analizar el escenario en el que el campus pueda llegar a ser considerado un nZEB (60% - 75% de ahorro), donde se necesitan sistemas de climatización mucho más eficientes y una sostenibilidad desde los DERs (remitirse a Figura 3-2). Debido a que los bloques del campus no cuentan en su mayoría con sistemas de climatización (en la ciudad de Manizales el clima es tropical), se analizó el proceso para lograr una disminución de 15% al 25% en el consumo anual de los bloques escogidos del campus por medio de la instalación de generación solar fotovoltaica.

El consumo anual de los bloques se muestra en la Tabla 3-14, se estimó una reducción por medio de los paneles solares fotovoltaicos para cada bloque. Para ello se necesitó conocer el consumo nZEB el cual se determinó calculando el ahorro generado por el 75% de reducción en el consumo de energía eléctrica en el consumo base de los bloques del campus la Nubia (Tabla 3-13); luego, se calculó la diferencia entre el consumo LEB y el consumo nZEB, el resultado determinó la potencia PV necesaria para que estos bloques pasen de ser LEB a ser nZEB.

Tabla 3-14. Estimación de consumo nZEB y potencia PV. **Fuente:** Elaboración propia.

Bloque	Area (m2)	Consumo base (kWh/ m2*año)	Consumo LEB - 50% (kWh/ m2*año)	75% del consumo base (kWh/m2*año)	Consumo para ser un nZEB (kWh/ m2*año)	Potencia PV (kWh/ m2*año)	Generación PV (kWh/año)	Potencia PV (kWh) H.E: 4,5 dia
L	7226	49,6	27,3	37,2	12,4	14,9	107.461,4	65,4
P	3555	49,2	24,6	36,9	12,3	12,3	43.722,0	26,6
Q	3700	65,5	32,7	49,1	16,4	16,4	60.578,7	36,9
S1	2452	51,6	28,4	38,7	12,9	15,5	37.927,6	23,1
S2	5000	50,6	27,8	37,9	12,6	15,2	75.855,1	46,2
W	5200	40,5	22,3	30,4	10,1	12,2	63.212,6	38,5
TOTAL	***27133***	***306,9***	***163,1***	***230,2***	***76,7***	***86,3***	***388757,5***	***236,7***

Como se muestra en la Tabla 3-14, la potencia PV necesaria para que los 6 bloques analizados sean nZEB fue de 388.757 kWh/año. En Manizales las horas efectivas de sol se pueden considerar en 4,5 horas al día [156]; por lo que se obtiene una potencia PV de 236,7 kWh necesaria para que los 6 bloques filtrados sean considerados nZEB.

Cabe recordar que el bloque W cuenta con un arreglo solar fotovoltaico de 10 kWh (40 paneles de 250 W) por lo qué, la potencia PV necesaria en este bloque pasa de ser 38,5 kWh a ser 28,5 kWh y la potencia PV 226,7kWh. El dimensionamiento de la cantidad de paneles, el área requerida para las instalaciones de la generación PV y el costo del arreglo se muestra en la Tabla 3-15.

Tabla 3-15. Dimensionamiento general y económico sistema solar fotovoltaico nZEB.
Fuente: Elaboración propia.

Bloque	**Potencia PV (kWh)** Horas efectivas: 4,5 al dia	**Cantidad de paneles requeridos**	**m^2 Requeridos en cubierta**	**m^2 Disponibles en cubierta de los bloques**	**$ Precio del sistema (on grid) y sin IVA (Ley 1715)**
L	65,4	198	496	3300	$ 242.074.438
P	26,6	81	202	1000	$ 98.491.070
Q	36,9	112	279	1200	$ 136.463.531
S1	23,1	70	175	0	$ 85.438.037
S2	46,2	140	350	2000	$ 170.876.074
W	28,5	86	216	1000	$ 105.396.728
TOTAL	***226,7***	***687***	***1717***	***8500***	***$ 838.739.879***

En la Tabla 3-15, para determinar la cantidad de paneles requeridos se dividió la potencia PV calculada entre la potencia del panel solar escogido, se tomaron como referencia los paneles de 330 Wp para estos cálculos. Para determinar el área requerida en la cubierta se multiplicó la cantidad de paneles requeridos de cada bloque por el área que ocupará cada panel, que se estimó de 2,5 m^2 cada panel. El área disponible de las cubiertas se obtuvo de mediciones de área en Google Earth.

El precio del montaje del arreglo solar según precios del mercado (Grupo GAMACO) se obtuvo multiplicando los kWh de cada bloque por un precio de instalación por kWh estimado de $3.700.000 (precio *on grid*); el suministro de instalación de panel solar incluye: estructura metálica (soporte), panel, inversor, cableado, protecciones, medidor bidireccional (si se requiere) y los tramites que lleve consigo. Este precio no contempla el IVA gracias a los beneficios ofrecidos por la Ley 1715 de 2014 por ser un proyecto relacionado con las fuentes renovables no convencionales [129].

3.2.2 Análisis de ubicación para sistema solar fotovoltaico nZEB.

El objetivo de los ZEB es disminuir los consumos y optimizar los rendimientos energéticos de las edificaciones. Para el caso del diseño del sistema solar fotovoltaico del campus, se pretende encontrar una configuración y ubicación óptima del arreglo PV que disminuya las pérdidas de generación del sistema. Para ello se desarrollaron tres (3) escenarios nZEB donde se disponen diferentes ubicaciones de los paneles solares. Estos escenarios se simularon en DIgSILENT con todas las características del modelo del campus la Nubia; los parámetros de los trasformadores, conductores, subestaciones, cargas de los bloques, tensiones de los barrajes, entre otros se obtuvieron del diagrama unifilar del campus la Nubia proporcionado por el grupo de investigación E3P y los datos plasmados en la Tabla 3-9. La capacidad de generación PV para alcanzar la clasificación del estándar nZEB en los tres (3) escenarios se obtuvieron del dimensionamiento PV nZEB presentado en la Tabla 3-15.

El modelo de los tres (3) escenarios se llevó a cabo por medio de un lenguaje de programación – DPL (DigSilent Programming Language) que permite simular los datos de energía neta, generación total, energía total y pérdidas totales en un año de funcionamiento del sistema en las condiciones del modelo del campus la Nubia con las curvas características del perfil de demanda diaria de una institución educativa. A Continuación, se muestran los resultados de las simulaciones de los escenarios para determinar la ubicación óptima del arreglo PV.

Cada arreglo PV se simula a través de la instalación de 2 inversores en paralelo con la misma capacidad. Dicha configuración obedece a que se presenta una mayor confiabilidad en el sistema solar.

Escenario nZEB 1: Distribución de PV en bloques L, P, Q, S2 y W

En este escenario el arreglo solar fotovoltaico y la generación por bloque requerida se instaló en las áreas disponibles de los bloques L, P, Q, S2 y W como se observa en la Tabla 3-15. No se tuvo en cuenta el bloque S1 debido a que este no tiene área disponible para instalación de paneles solares, también cabe anotar que el bloque S2 al tener un área en su tejado conformado por una estructura en diente cierra debería reformar su superficie

para la instalación de los arreglos PV; por lo tanto, la carga de generación del bloque S1 se adicionó a la superficie disponible del bloque S2. Por otra parte, también se tuvo en cuenta la potencia existente en el bloque W de 10kW.

El modelo de este escenario se muestra en la Figura 3-9 y La potencia PV que se simuló en cada bloque se muestra en la Tabla 3-16. También se muestran los resultados obtenidos con la simulación del DPL.

Tabla 3-16. Potencia PV escenario nZEB 1. **Fuente:** Elaboración propia.

Bloque	L	P	Q	S2	W	**Total**
Potencia PV (kW)	65,4	26,6	36,9	69,3	38,5	236,7

```
||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||
|||||RESUMEN DEL SISTEMA ELÉCTRICO DEL CAMPUS LA NUBIA|||||
||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||
Flujo de Carga exitoso para 12 meses

Resumen:
Energía Neta=     5,718 MWh
Generación Total =    11,372 MWh
Energía Total =    17,047 MWh
Pérdidas Totales =     0,523 MWh
Today is Wednesday, day 04 of August in the year 2021.
```

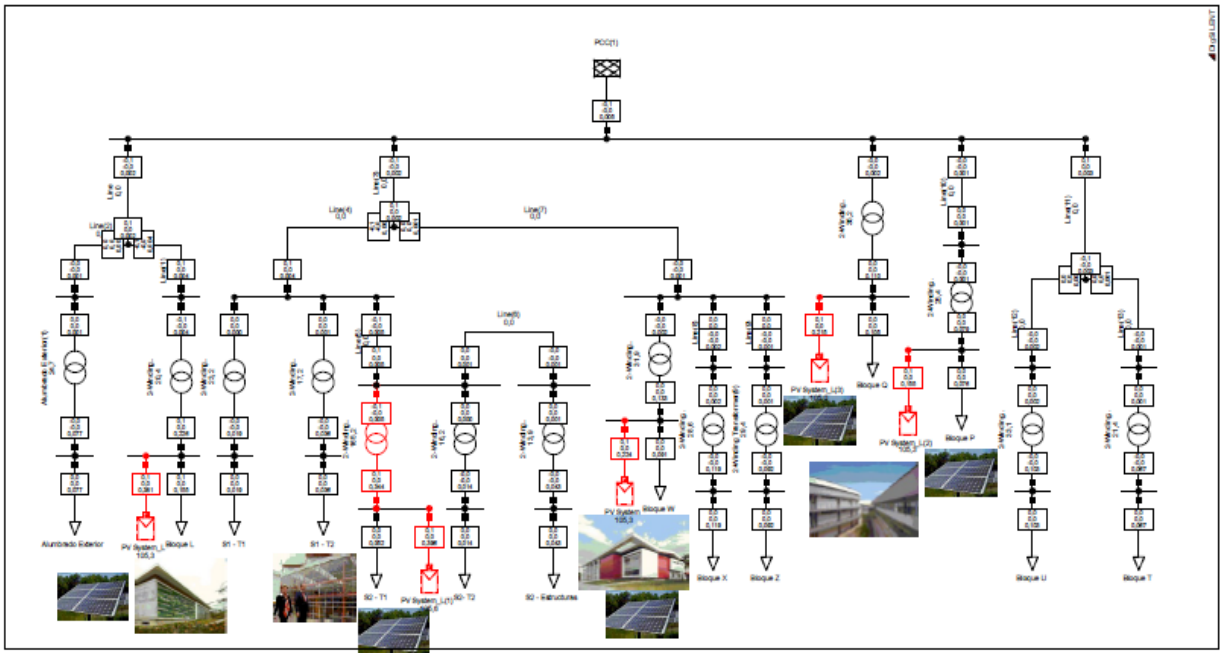


Figura 3-9. Modelo escenario nZEB 1. **Fuente:** Elaboración propia.

Escenario nZEB 2: Distribución de PV en bloques L y W

En este escenario el arreglo solar fotovoltaico y la generación por bloque requerida se instaló en las áreas disponibles de los bloques L y W como se observa en la Tabla 3-15. también se tuvo en cuenta la potencia existente en el bloque W de 10kW. El modelo de este escenario se muestra en la

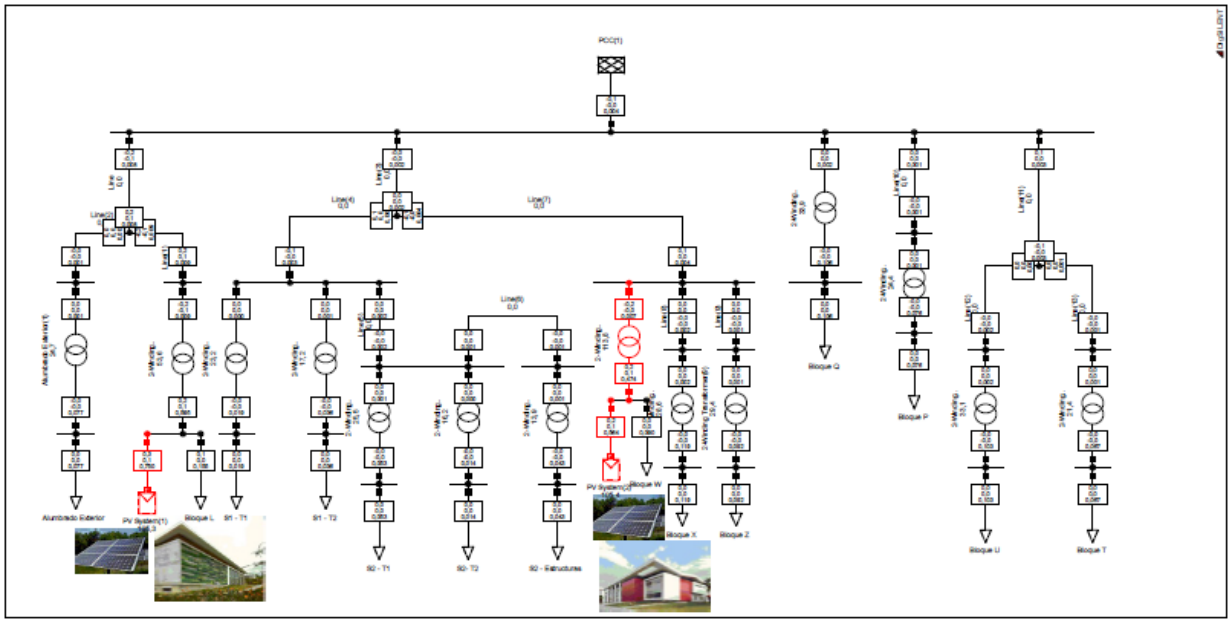


Figura **3-10** y La potencia PV que se simuló en cada bloque se muestra en la Tabla 3-17. También se muestran los resultados obtenidos con la simulación del DPL.

Tabla 3-17. Potencia PV escenario nZEB 2. **Fuente:** Elaboración propia.

Bloque	L	W	Total
Potencia PV (kW)	128,9	98	236,7

```
|||||RESUMEN DEL SISTEMA ELÉCTRICO DEL CAMPUS LA NUBIA|||||
||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||
Flujo de Carga exitoso para 12 meses

Resumen:
Energía Neta=     6,199 MWh
Generación Total =    10,897 MWh
Energía Total =    17,048 MWh
Pérdidas Totales =     0,570 MWh
```

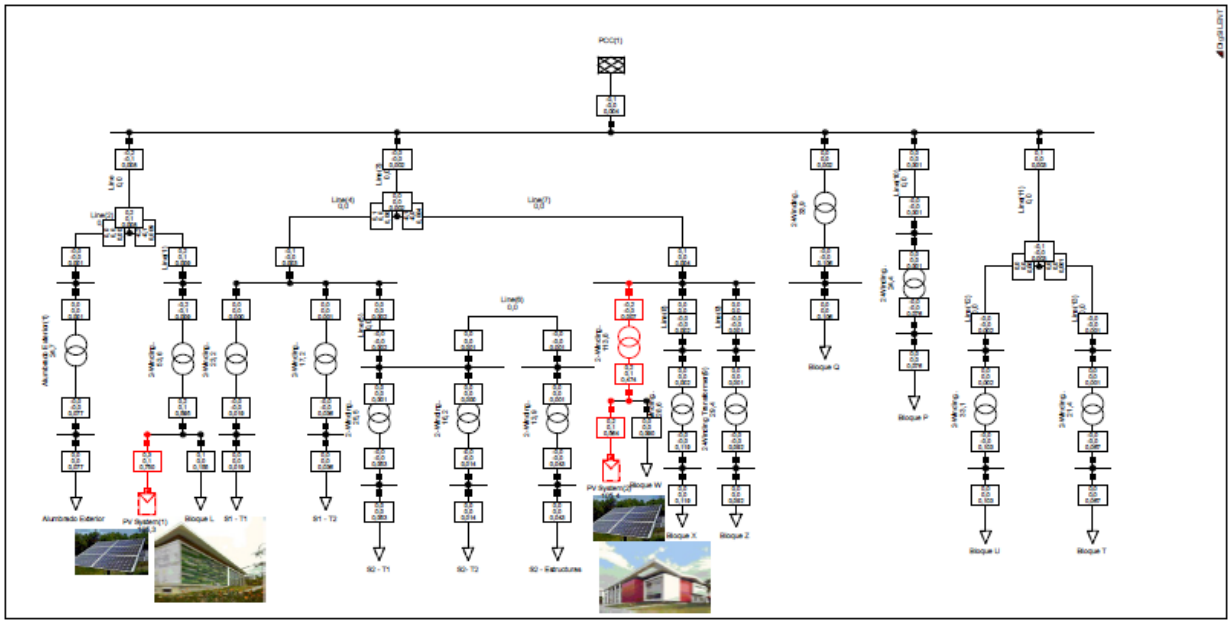


Figura 3-10. Modelo escenario nZEB 2. **Fuente:** Elaboración propia.

Escenario nZEB 3: Distribución de PV en bloques P, Q y W

En este escenario el arreglo solar fotovoltaico y la generación por bloque requerida se instaló en las áreas disponibles de los bloques P y Q como se observa en la Tabla 3-15. también se tuvo en cuenta la potencia existente en el bloque W de 10kW. El modelo de este escenario se muestra en la Figura 3-11 y La potencia PV que se simuló en cada bloque se muestra en la Tabla 3-18. También se muestran los resultados obtenidos con la simulación del DPL.

Tabla 3-18. Potencia PV escenario nZEB 3. **Fuente:** Elaboración propia.

Bloque	P	Q	W	**Total**
Potencia PV (kW)	100	126,7	10	236,7

```
|||||RESUMEN DEL SISTEMA ELÉCTRICO DEL CAMPUS LA NUBIA|||||
||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||
Flujo de Carga exitoso para 12 meses

Resumen:
Energía Neta=     5,745 MWh
Generación Total =    11,377 MWh
Energía Total =    17,050 MWh
Pérdidas Totales =     0,871 MWh
Today is Wednesday, day 04 of August in the year 2021.
```

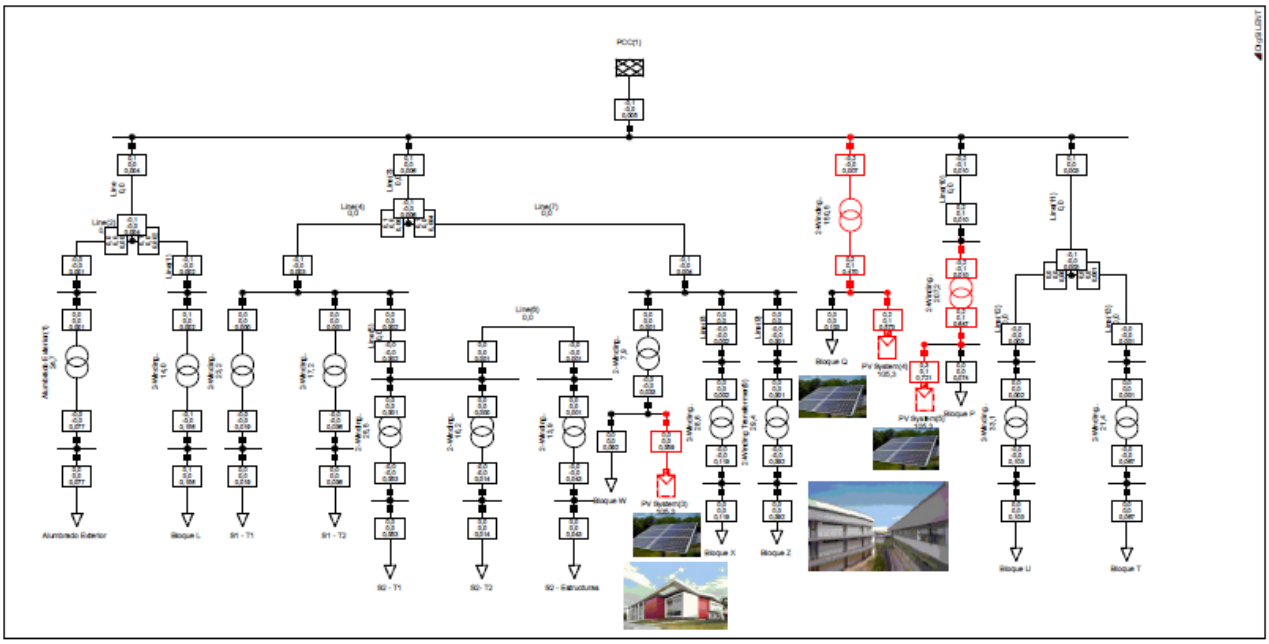


Figura 3-11. Modelo escenario nZEB 3. **Fuente:** Elaboración propia.

Ubicación óptima de sistema PV nZEB

Como se puede observar en las simulaciones de los tres escenarios, se obtienen menos pérdidas eléctricas cuando se distribuye los paneles en todos los bloques filtrados (escenario 1), las cuales son de 523 kWh al año.

Las pérdidas eléctricas normalmente representan entre el 3% y 10% de la energía total, la cual es la suma de la generación producida por el sistema PV y la energía importada de la red (energía neta). En este caso, las pérdidas representaron un 3% de la energía total, por lo que resulta que la configuración del sistema PV del escenario 1 minimiza las pérdidas eléctricas, el cálculo del porcentaje de pérdidas eléctricas con respecto a la energía total se muestra a continuación en la ecuación (9).

$$Energía\ total\ escenario\ nZEB\ 1 = \ 17{,}047\ MWh \tag{7}$$

$$Pérdidas\ electricas\ escenario\ nZEB\ 1 = 523\ kWh \tag{8}$$

$$Porcentaje\ de\ pérdidas\ eléctricas = \frac{523\ kWh}{17{,}047\ kWh} x100\% = \ 3\% \tag{9}$$

Por otra parte, se pudo determinar el ahorro económico que tendría la instalación del sistema PV del escenario 1; la universidad paga aproximadamente $480 pesos colombianos - COP por cada kWh. Multiplicando este precio por la generación total producida por el sistema PV (11,372 kWh) se obtiene un ahorro de $5.458.560 COP al mes.

Los valores son estimados a partir del perfil de demanda característico de una institución educativa (Figura 3-4), dicho perfil representa el consumo diario del campus. No se consideran los meses pico de consumo, así como los meses en que la universidad está deshabitada por las vacaciones estudiantiles o demás circunstancias. Tampoco se consideran las condiciones climatológicas de radiación solar en el año.

Los resultados obtenidos en la simulación representan la generación solar, energía neta generada y energía total en un año. La potencia PV calculada para cada bloque tiene en cuenta los factores de corrección anuales y diarios aplicados en la Tabla 3-12, debido a que se obtienen a partir de las reducciones en el consumo calculado para cada bloque que se desea alcanzar en la clasificación nZEB .

Para trabajos futuros se puede incluir en el modelo del DPL el análisis de reactivos que genera el campus. Sin embargo, la Universidad no genera tantos reactivos debido al tipo de cargas que tiene (en su mayoría de carácter académico). Además, estos reactivos se encuentran entre los límites establecidos por la CREG 015.

3.2.3 Perfil de demanda en condiciones de operación nZEB.

El nuevo perfil de demanda con la inclusión de los arreglos solares fotovoltaicos para cada bloque nZEB comparado con los consumos base y LEB se muestra en la Tabla 3-19 y Figura 3-12.

Tabla 3-19. Comparación consumos base, LEB y nZEB. **Fuente:** Elaboración propia.

Bloque	Consumo base (kWh/ m2*año)	Consumo LEB (kWh/ m2*año)	Consumo nZEB (kWh/ m2*año)
L	49,6	27	12,4
P	49,2	25	12,3
Q	65,5	33	16,4
S1	51,6	28	12,9
S2	50,6	28	12,6
W	40,5	22	10,1
TOTAL	306,9	163	76,7

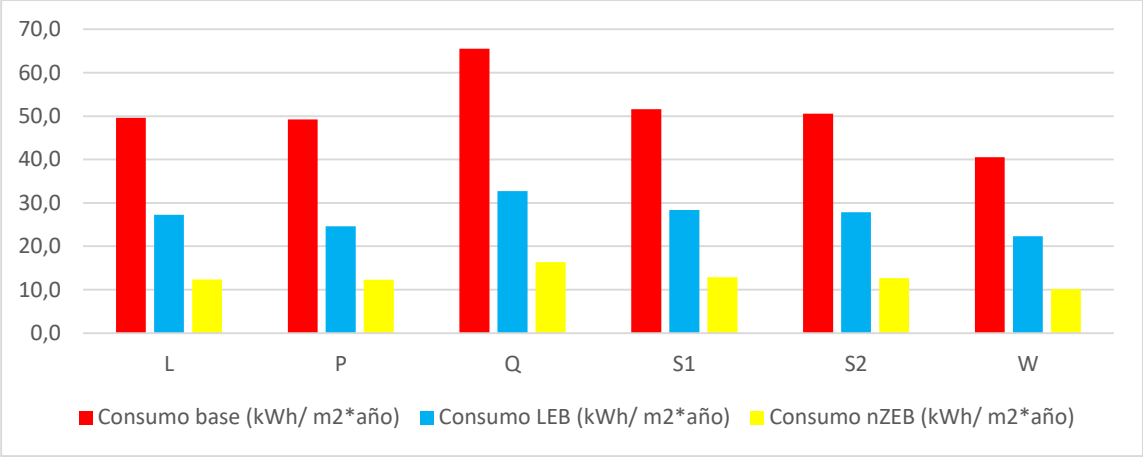


Figura 3-12. Comparación consumos base, LEB y nZEB. **Fuente:** Elaboración propia.

Para seguir escalando en la clasificación de ZEB y pasar de tener un campus nZEB a un NZEB se necesita incorporar tecnologías inteligentes que suministren datos y que abran el camino para automatizar y controlar diferentes acciones y/o procesos en los bloques, como se muestra a continuación.

3.3 Net Zero Energy Buildings - NZEB

3.3.1 Sostenibilidad desde los DERs (largo plazo)

Dimensionamiento sistema solar fotovoltaico NZEB

En un escenario NZEB, el sistema solar fotovoltaico debe satisfacer el consumo del campus restante que no se pudo alimentar con la conjunción de medidas de diseño pasivo y activo aplicado en los anteriores escenarios ZEB. Esto significa que en este escenario el campus debe satisfacer el 100% de su demanda.

El consumo anual de los bloques se muestra en la Tabla 3-20. Se estimó una reducción por medio de los paneles solares fotovoltaicos para cada bloque. Para ello se necesitó conocer el consumo NZEB el cual se determinó calculando el ahorro generado por el 100% de reducción en el consumo de energía eléctrica en el consumo base de los bloques del campus la Nubia. Luego, se calculó la diferencia entre el consumo LEB y el consumo NZEB, el cual debe de ser cero puesto que se obtiene un 100% de ahorro en este escenario; en otras palabras, el sistema solar fotovoltaico NZEB debe alimentar la totalidad de la demanda del escenario LEB, la cual es el consumo que no se pudo satisfacer por medio de las medidas de diseño pasivas y activas descritas en esa clasificación. La Tabla 3-20 también muestra la potencia PV necesaria para ser un NZEB.

Tabla 3-20. Estimación de consumo NZEB y potencia PV. **Fuente:** Elaboración propia.

Bloque	Area (m2)	Consumo base (kWh/ m2*año)	Consumo LEB - 50% (kWh/ m2*año)	100% del consumo base (kWh/m2*año)	Consumo para ser un NZEB (kWh/ m2*año)	Potencia PV (kWh/ m2*año)	Generación PV (kWh/año)	Potencia PV (kWh) H.E: 4,5 dia
L	7226	49,6	27,3	49,6	0,0	27,3	197.012,6	119,9
P	3555	49,2	24,6	49,2	0,0	24,6	87.444,1	53,2
Q	3700	65,5	32,7	65,5	0,0	32,7	121.157,5	73,8
S1	2452	51,6	28,4	51,6	0,0	28,4	69.533,9	42,3
S2	5000	50,6	27,8	50,6	0,0	27,8	139.067,7	84,7
W	5200	40,5	22,3	40,5	0,0	22,3	115.889,8	60,6
TOTAL	***27133***	***306,9***	***163,1***	***306,9***	***0,0***	***163,1***	***730105,5***	***434,5***

Como se muestra en la Tabla 3-20, la potencia PV necesaria para que los 6 bloques analizados sean NZEB fue de 730.105,5 kWh/año. En Manizales las horas efectivas de sol son de 4,5 horas al día [156]; por lo que se obtuvo una potencia PV de 434,5 kWh necesaria para que los 6 bloques filtrados fueran considerados NZEB. En la Tabla 3-21 se tuvo en

cuenta el sistema solar fotovoltaico existente en el bloque W y se presenta el dimensionamiento de la cantidad de paneles, el área requerida para las instalaciones de la generación PV necesaria para ser NZEB y el costo del arreglo.

Tabla 3-21. Dimensionamiento general y económico sistema solar fotovoltaico NZEB.
Fuente: Elaboración propia.

Bloque	Potencia PV (kWh) Horas efectivas: 4,5 al dia	Cantidad de paneles requeridos	m^2 Requeridos en cubierta	m^2 Disponibles en cubierta de los bloques	$ Precio del sistema (on grid) y sin IVA (Ley 1715)
L	119,9	363	909	3300	$ 443.803.137
P	53,2	161	403	1000	$ 196.982.141
Q	73,8	224	559	1200	$ 272.927.063
S1	42,3	128	321	0	$ 156.636.401
S2	84,7	257	641	2000	$ 313.272.802
W	50,6	153	383	1000	$ 187.060.669
TOTAL	***424,5***	***1286***	***3216***	***8500***	***$ 1.570.682.212***

Los resultados obtenidos en la columna 3 de la Tabla 3-21, denominada cantidad de paneles requeridos fueron obtenidos a partir de la división de la potencia PV calculada entre la potencia del panel solar escogido, como se mencionó en el anterior escenario (*3.2.1 Sostenibilidad desde los DERs (corto plazo))* se tomaron como referencia los paneles de 330 Wp para estos cálculos. Para determinar el área requerida en la cubierta se multiplicó la cantidad de paneles requeridos de cada bloque por el área que ocupa cada panel, que se estimó de 2,5 m^2 cada panel. El área disponible de las cubiertas se obtuvo de mediciones de área en Google Earth y el precio del montaje del arreglo solar se obtuvo de la misma manera que en el escenario nZEB que se muestra en la Tabla 3-15.

3.3.2 Análisis de ubicación para sistema solar fotovoltaico NZEB.

En este análisis, se realizaron los mismos escenarios expuestos en la sección 3.2.2 *"Análisis de ubicación para sistema solar fotovoltaico nZEB"* pero con los datos de potencia PV necesaria para que los bloques filtrados del campus sean NZEB (Tabla 3-21. Dimensionamiento general y económico sistema solar fotovoltaico NZEB.

En la Tabla 3-22 se muestra el resumen de los tres (3) escenarios de ubicación óptima para el escenario NZEB del campus la Nubia. Se puede observar cómo los escenarios 1 y

2 representan los mismos resultados y las mismas pérdidas de energía eléctrica y en ambos casos son menores a las del escenario 3, por lo que se puede decidir en adoptar una configuración de los sistemas PV para NZEB de manera distribuida en todos los bloques o centralizar el sistema PV en los bloques L y W.

Tabla 3-22. Escenarios de sistemas PV para NZEB. **Fuente:** Elaboración propia.

	Escenario 1	**Escenario 2**	**Escenario 3**
Configuración	Sistemas PV en las áreas disponibles de los bloques L, P, Q, S2 y W.	Sistemas PV en las áreas disponibles de los bloques L y W	Sistemas PV en las áreas disponibles de los bloques P, Q y existente en W.
Potencia PV NZEB	L: 119,9 kW P: 53,2 kW Q: 73,8 kW S2: 127 kW W: 60,6 kW	L: 246,9 kW W: 187,6 kW	P: 200 kW Q: 224,5 kW W: 10 kW
Resultados	Resumen: Energía Neta= -3,704 MWh Generación Total = 20,861 MWh Energía Total = 17,041 MWh Pérdidas Totales = 1,399 MWh	Resumen: Energía Neta= -3,709 MWh Generación Total = 20,861 MWh Energía Total = 17,041 MWh Pérdidas Totales = 1,339 MWh	Resumen: Energía Neta= -3,597 MWh Generación Total = 20,856 MWh Energía Total = 17,041 MWh Pérdidas Totales = 2,617 MWh

El hecho de que las pérdidas en el caso NZEB fueran mayores a las de nZEB corresponde a que entre mayor generación PV mayores pérdidas tendrá el sistema, ya que se puede ver que casi que se duplicó la potencia PV (PV nZEB: 236, 7 kW a PV NZEB: 434,4 kW) mientras que las pérdidas representaron poco menos del triple (523 kW en nZEB y 1,399 kW en NZEB). El hecho de que la energía neta refleje consumos negativos se debe a que en las simulaciones del modelo el campus estuvo exportando energía a la red eléctrica, ya que la suma entre la generación total y la energía neta resulta en la energía total del sistema eléctrico del campus. Realmente el campus con las configuraciones del escenario 1 y 2 no estaría exportando excedentes energéticos a la red, debido a que la estimación de los sistemas PV para cada bloque corresponde al de la clasificación NZEB (o sea que se llevan los consumos energéticos a cero).

Los resultados de la Tabla 3-22 se pueden deber a que falta considerar muchas más variables en las simulaciones y periodos de tiempo más reales así como condiciones

climáticas y de radiación solar; de igual manera, el objetivo de estas simulaciones corresponde a determinar el lugar óptimo para ubicar los sistemas PV y, tanto en el escenario nZEB como en el NZEB el escenario 1 fue el que presentó menores perdídas de energía eléctrica, concluyendo que la mejor ubicación de los sistemas solares fotovoltaicos se da de manera distribuida en los diferentes bloques y así se logra optimizar el rendimiento energético del campus. Además de que, las pé rdidas en del escenario 1 del estándar NZEB también representaron entre un 3 a 10% de la energía neta simulada, como se muestra a continuación en la ecuación (12).

$$Energía\ total\ escenario\ NZEB\ 1 = 17{,}041\ MWh \tag{10}$$

$$Pérdidas\ eléctricas\ escenario\ nZEB\ 1 = 1{,}399\ kWh \tag{11}$$

$$Porcentaje\ de\ pérdidas\ electricas = \frac{1{,}399\ kWh}{17{,}041\ kWh} x100\% = 8{,}2\ \% \tag{12}$$

3.3.3 Perfil de demanda en condiciones de operación NZEB.

El nuevo perfil de demanda con la inclusión de los arreglos solares fotovoltaicos para cada bloque NZEB debe de ser de 0 kW, debido a que como se mencionó anteriormente la combinación de todas las técnicas de diseño pasivo y activo aplicados en los escenarios ZEB debe de resultar en edificios de balance energético cero.

Igualmente se muestra la comparación con los consumos base, LEB, nZEB y NZEB a manera de conclusión en la tabla 3-23. Si se añadiera el siguiente escenario PEB en la comparación simplemente reflejaría valores negativos, puesto que los bloques pasarían de tener consumos energéticos a tener excedentes energéticos.

Tabla 3-23. Comparación consumos base, LEB, nZEB y NZEB. **Fuente:** Elaboración propia

Bloque	Consumo base (kWh/ m2*año)	Consumo LEB (kWh/ m2*año)	Consumo nZEB (kWh/ m2*año)	Consumo NZEB (kWh/ m2*año)
L	49,6	27,3	12,4	0,0
P	49,2	24,6	12,3	0,0
Q	65,5	32,7	16,4	0,0
S1	51,6	28,4	12,9	0,0
S2	50,6	27,8	12,6	0,0
W	40,5	22,3	10,1	0,0
TOTAL	**306,9**	**163,1**	**76,7**	**0,0**

3.3.4 Escenarios primarios para BMS – BAS.

Para alcanzar un estado NZEB y reducir aún más el consumo de energía eléctrica se debe invertir en sistemas de adquisición de datos – SADA. Para el caso del campus, se analizó el estado actual de las comunicaciones internas de la universidad para integrarlos con los nuevos equipos de adquisición de datos y así se idearon los escenarios y posibles hojas de ruta que encaminen al campus a ser un NZEB, todo esto acompañados de sistemas SGEn que optimicen estos procesos. En este caso, se debe llevar al campus a tener sistemas BMS o, si se cuenta con automatización y control, sistemas BAS.

El éxito de la implementación del SGEn, desde su planificación, está relacionado con la robustez de la red de comunicaciones y el internet de las cosas (IoT), ya que a partir de este parámetro el control y el monitoreo de la actividad energética del campus es constante y continuo. Este fortalecimiento de las redes de comunicación brinda una seguridad en cuanto a la adquisición de los datos e información para el análisis en el desarrollo del SGEn [144].

Entre los años 2020 y 2021, el grupo de investigación Environmental energy and Education Policy – E3P desarrolló el proyecto “: Laboratorio de la Gestión de la Demanda Eléctrica – GESDELEC”, el cual consistió en la adquisición de equipos por parte de la universidad nacional sede Manizales campus la Nubia para desarrollar sistemas de adquisición de

datos que fortalezcan la investigación, docencia y labores académicas en términos de gestión de la demanda. Los equipos adquiridos en el proyecto se muestran en la Tabla 3-24.

Tabla 3-24. Equipos adquiridos en GESDELEC. **Fuente:** Elaboración propia.

Dispositivo	Descripción	Modelo
(3)KING PIGEON GATEWAY S373	Cellular IoT Modbus Gateway 4G LTE proporciona 1 puerto Ethernet RJ45 para conectar Internet WAN o LAN, y 2 puertos serie RS485, admite 128 etiquetas de E / S extendidas a través del Modbus RTU. Puede monitorear y operar los puertos RS485 y extender etiquetas de E / S por SMS, APLICACIÓN, servidor web, Internet.	
(1)KING PIGEON RTU S272	El GSM 3G/4G M2M RTU es una unidad terminal remota de múltiples puertos de E / S, a través del puerto RS232 / 485 puede conectar medidores inteligentes o PLC. Es especial para monitoreo BTS, adquisición remota de datos, telemétricamente, control de acceso BTS y otras aplicaciones. Admite entradas de voz, SMS, GPRS, 3G.	
(1)Analizador de Redes	Equipo portátil con carcasa robusta de alta resistencia, diseñado para monitorear parámetros Eléctricos mediante Internet, con la plataforma en la Nube “SARACLOUD”. Los parámetros monitoreados son: Tensión, Corriente, Potencias Activa/Reactiva /Aparente, THDv, THDi, Factor de Potencia y Consumos kWh.	
(2)Equipos de cómputo portátil	Portátil Lenovo Ideapad S145-14IL, Procesador Intel Core i3 1005G1 (2C / 4T, 1.2 / 3.4GHz, 4MB), Memoria 4GB RAM DDR4-2666, Almacenamiento 1TB HDD 5400rpm 2.5" Pantalla 14" HD (1366x768) TN 220nits Anti-glare	

(4)Sensores de humedad y temperatura	Medición de humedad y temperatura	
(1) 4G LoRa Gateway S281 King Pigeon	WIRELESS LORA GATEWAY INTERNET OF THINGS GATEWAY 433MHZ 4G, ETHERNET DATA ACQUISITION MODULE (INCLUYE SERVICIO DE LA NUBE) CPU, ARM® CORTEXTM-M4 32BITS RTOS.MEMORY MAX.2000 RECORDS AND 500, ALARM RECORDER.CELLULAR GSM/3G/4G LTE. LORA FREQUENCY DEFAULT: 420HMZ-450MHZ, OPTIONAL:868MHZ OR 915MHZ. RELATED VOLTAGE RECOMMEND: DC 12V/1.5A, RANGE:9-36VDC. POWER CONSUMPTION, STANDBY:12V/130MA; WORKING:12V/150MA; CHARGING. BATTERY:12V/180MA. BACKUP BATTERY 3.7V 900MAH, LAST ABOUT 3 HOURS. USB PORT MICRO USB.	

Los Gateway S373 cuentan con 1 entrada para sensores de medición de temperatura y humedad por medio entradas digitales donde se puede trasmitir la información por red celular (puertos dual SIM), LAN o WAN (puerto ethernet) a un software proporcionado por el fabricante para la programación del dispositivo; al igual que se pueden conectar y transmitir los datos de otros equipos que cuenten con entradas RS 485 como analizadores de redes, reconectador, medidores inteligentes, otros sensores, entre otros (el Gateway cuenta con 2 puertos en serie RS 485 y cada una soporta la inclusión de 32 dispositivos, por lo que el Gateway soportaría 64 dispositivos conectados y pueden extraer o leer 128 registros). Sin embargo, estos equipos no pueden realizar labores de control o automatización, ya que solo están diseñados para la adquisición de datos [157], [158].

Por otra parte, los RTU S272 si cuentan con la posibilidad de realizar labores de control o automatización desde aplicaciones móviles, el software que ofrece el fabricante o la nube, pero no tienen la oportunidad de transmitir la información de los dispositivos conectados a este por vía celular ya que, la entrada *sim card* con la que dispone está dedicada a conectarse con la app móvil (que se puede configurar) para que se realicen maniobras de automatización o control además de la recepción de datos [157].

Si se quiere tener una adquisición de datos centralizada de los RTU y a la vez tener la capacidad de controlar algunas variables se pueden conectar los Gateway S373 con los S272 para que conjuntamente realicen labores de control y automatización de los equipos esclavos al igual que se transmiten los datos vía celular a una unidad central de cómputo.

Por otra parte, el último equipo adquirido con rubros de GESDELEC Fue el 4G LORA Gateway S281, el cual puede servir como una alternativa de comunicación a la red celular (se cambia los S373 por antenas LoRa) [159]. Este protocolo de comunicación se da por medio de radiofrecuencia a un radio de 2500 m, de allí se pueden conectar al S281 como esclavos los dispositivos, sensores, equipos, entre otros e incluso los S272 si se quiere realizar labores de automatización y control. Estas conexiones de esclavos se realizan por medio de las antenas de radiofrecuencia que disponen y se pueden trasmitir todos los registros de los dispositivos que tengan conectados.

A partir de los equipos descritos anteriormente se desarrollaron 2 escenarios de implementación de sistemas de adquisición de datos por medio de BMS y de automatización y control por medio de BAS (en un estado básico) en el campus La Nubia. Estos escenarios se describen a continuación:

Escenario 1: Desarrollo de BMS en los bloques del campus la Nubia

- **Opción 1: BMS por medio de Gateways S373**

En la Figura 3-13, se muestra las posibilidades de adquisición de datos por que presentan los Gateway S373 de acuerdo a sus características y especificaciones.

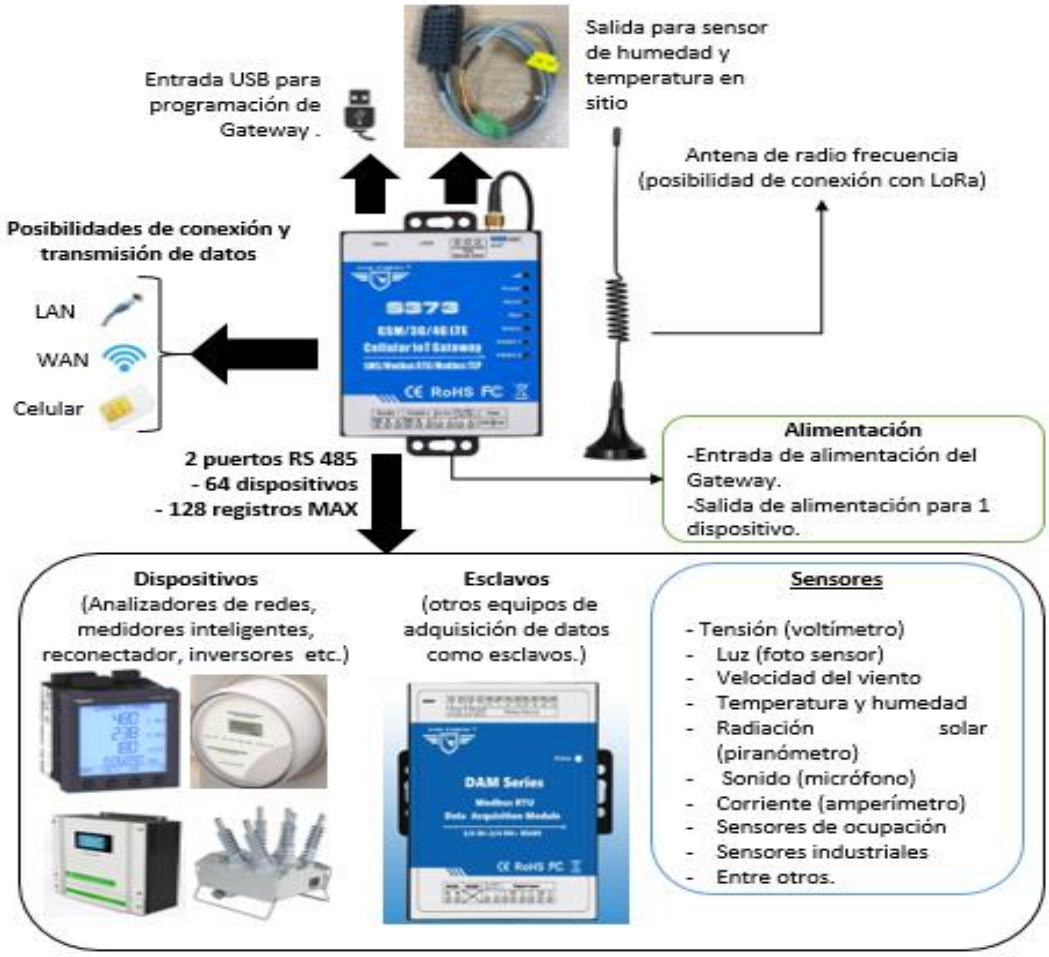


Figura 3-13. Posibilidades técnicas para adquisición de datos por medio del Gateway S373. **Fuente:** Elaboración propia.

La adquisición de equipos como los Gateway S373 generan oportunidades de extracción de información de registros de consumo de algunos bloques del campus la Nubia que cuentan con analizadores de redes e inversores con puertos RS 485. La Figura 3-14 describe la propuesta para BMS en algunos bloques de la universidad por medio de S373.

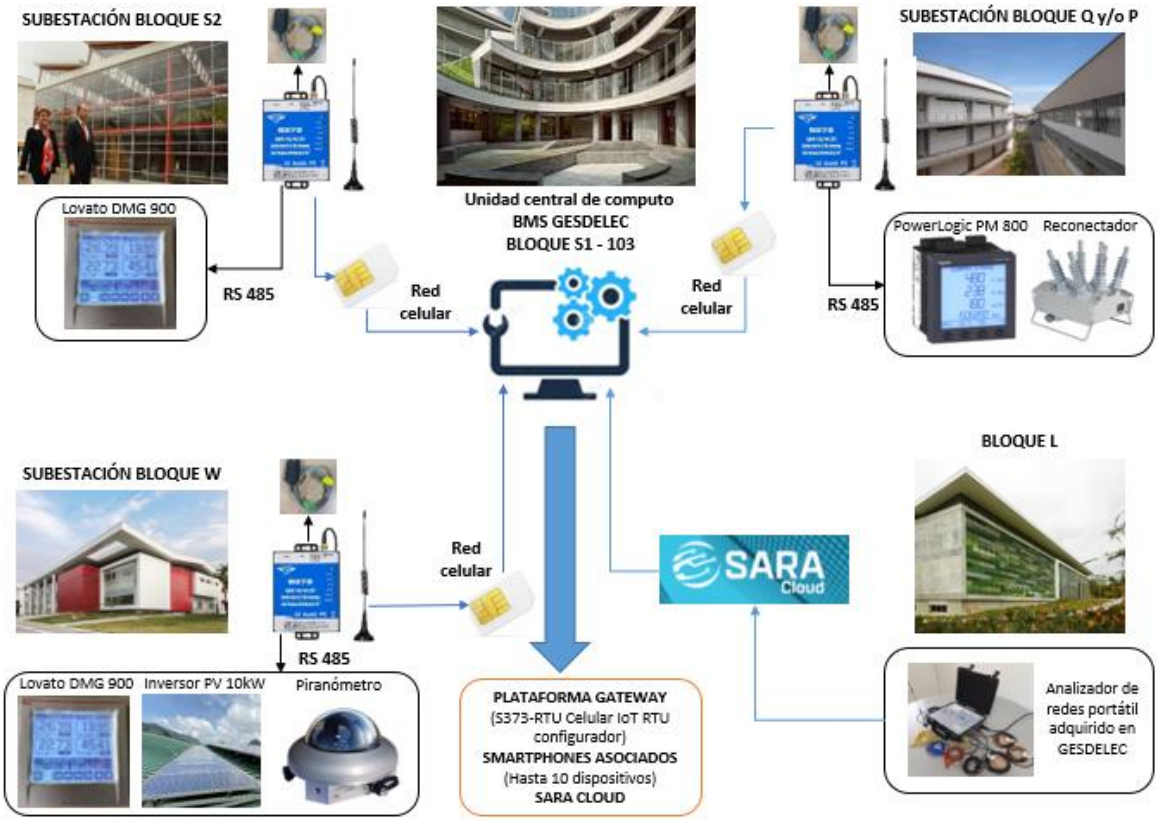


Figura 3-14. Propuesta BMS por medio de S373 para algunos bloques del campus la Nubia. **Fuente:** Elaboración propia.

Como en esta tesis se filtró el análisis energético a los bloques L, S1, S2, W, P y Q; La propuesta para SADA en los bloques del campus la Nubia es ubicar 2 de los Gateway S373 en las subestaciones de los bloques W y S2, los cuales tienen analizadores de redes con entrada RS 485 (Lovato DMG 900) de donde se pueden extraer los registros que se deseen analizar por medio del mapa Modbus de los mismos. En el Gateway del bloque W también se pretende conectar por medio de RS 485 el inversor, con el fin de extraer los datos del sistema solar fotovoltaico de 10kW instalado en su cubierta; de igual manera se propone la adquisición de sensores de radiación (piranómetros) que se conecten al Gateway del bloque W, los cuales servirán para comparar los datos de generación y radiación arrojados por el Gateway y realizar laboratorios o investigación con ellos. Por otra parte, se puede utilizar la salida para medición del ambiente local que tiene los Gateway con el fin de saber la temperatura de los trasformadores y la temperatura ambiente y humedad relativa del inversor.

En la Figura 3-14 se puede ver también como el Gateway restante se conecta a un analizador de redes PM 800 en el bloque Q. Este analizador de redes hace parte del grupo E3P por lo que se decide ubicar en este bloque para censar los datos que se escojan del mapa Modbus del equipo (demanda, tensiones, potencias, etc.). De igual manera, el sensor de humedad y temperatura enviará datos del ambiente local de la subestación con lo que se podrán programar alarmas e informes periódicos. La ubicación de este Gateway en el bloque Q abre la posibilidad de estudiar la conexión del reconectador por medio de RS 485.

Para transmitir esta información de los registros medidos por los Gateway a una unidad de cómputo central (bloque S1 – 103) por medio de la plataforma que ofrecen los Gateway se utiliza la red celular (tarjetas SIM CARD con plan de datos), en la cual los Gateway van a estar conectados en tiempo real con los analizadores de redes de las subestaciones, inversor y sensores los cuales enviaran estos registros a la plataforma (nube) y dispositivos asociados que se programan desde allí. Desde el programa computacional que ofrece el fabricante se podrá programar él envió de alertas y estado actual de los registros escogidos.

Por otra parte, en las subestaciones donde no se cuente con salidas RS 485 para la extracción de datos como el bloque L existe la posibilidad de instalar el equipo de medición portátil (analizador de redes) adquirido en GESDELEC. Este dispositivo puede enviar la información de consumo del bloque del campus que este midiendo en tiempo real a la plataforma SARA CLOUD, la cual será gestionada desde el equipo de cómputo portátil también adquirido en GESDELEC ubicada en el bloque S1 - 103.

Para el bloque S1 se propone dedicar un Gateway que se conecte físicamente por vía ethernet con el equipo de cómputo centralizado, ya que la subestación del bloque se encuentra al lado del laboratorio donde se pretende tener el sistema de adquisición de datos por medio de BMS. Lo anterior podría servir para comparar las conexiones LAN/WAN físicas con comunicación vía red celular.

Se propone estudiar la posibilidad de adquirir sensores de ocupación para conectarlos con los Gateway. Lo anterior debido a generar conocimiento e investigación relacionados con pandemias como el COVID 19, donde la ocupación de ciertos espacios representa un dato necesario a la hora del ingreso y funcionamiento de los mismos. Si en un futuro la universidad decide adquirir más equipos de adquisición de datos y dispositivos de medición

se abre la posibilidad para tener información de todos los bloques de campus de manera centralizada, lo cual podría servir para desarrollar sistemas de gestión de energía y auditorías internas, donde se marquen metas a corto, mediano y largo plazo en cuanto al aumento de la eficiencia energética en el campus.

Las extracciones de los registros de analizadores de redes se deben programar desde la plataforma del Gateway de acuerdo con el mapa Modbus de cada equipo, a pesar de que se pueden conectar 64 dispositivos la cantidad de registros que puede almacenar y trasmitir cada Gateway es de 128. Si se desean obtener muchos datos provenientes de analizadores de redes lo recomendable es dedicar un Gateway a cada equipo, o en su defecto, conectarle al Gateway esclavos de sistemas de adquisición de datos que los censen. El anexo 1 muestra el proceso de montaje, programación y adquisición de datos del Gateway S373 para conectarse con un analizador de redes y un sensor de humedad y temperatura.

- **Opción 2: BMS por medios de Gateways LORA S282**

Una alternativa a la hora de idear sistemas BMS para el campus por medio de redes celulares es la implementación de redes LoRa en el campus la Nubia, como se muestra en la Figura 3-15.

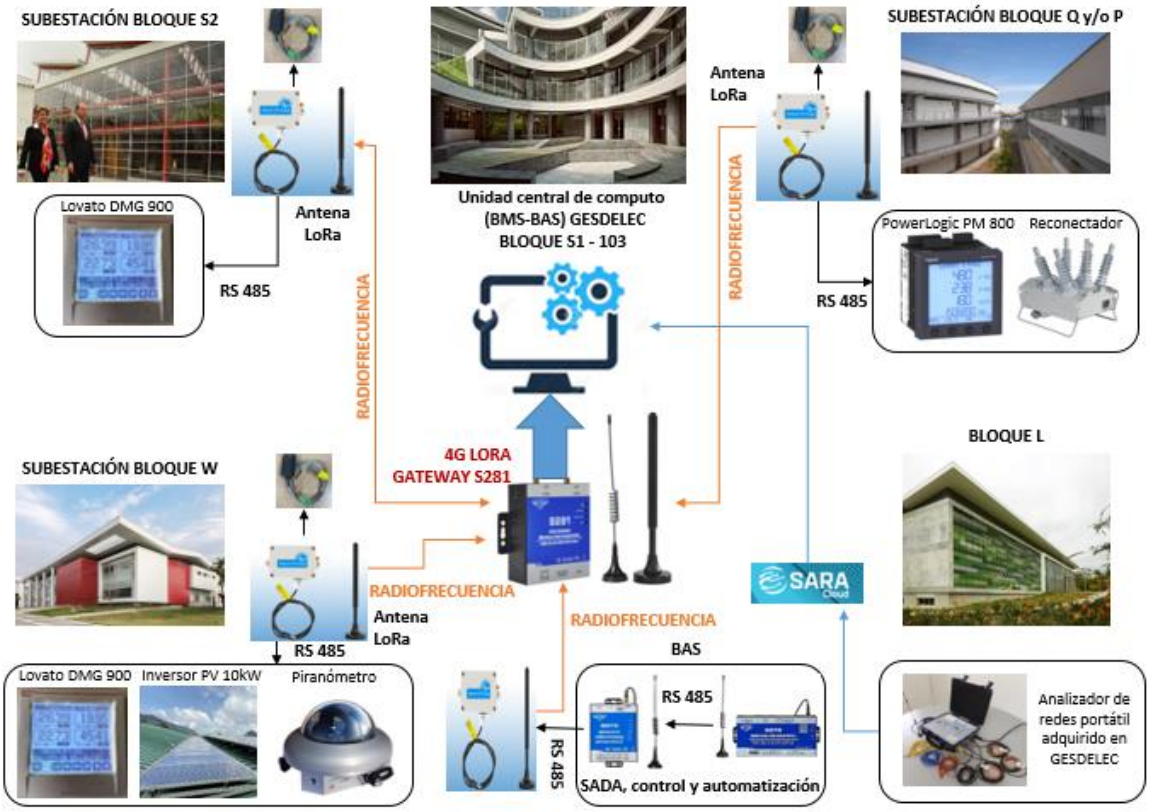


Figura 3-15. Propuesta BMS - BAS de algunos equipos del campus la Nubia por medio de redes LORA. **Fuente:** Elaboración propia.

La comunicación por medio del Gateway LORA S281 ofrece un campo de conexión por radiofrecuencia con un radio de hasta 2500m por medio de las antenas LoRa (99 módulos de puerto serie inalámbricos), por lo que todos los equipos conectados a estos pueden trasmitir la información registrada al dispositivo Gateway LORA S281, el cual a su vez puede enviar su información a un servidor de cómputo centralizado. Este sistema ofrece independencia de las redes celulares, LAN y WAN y la utilización de antenas LORA que funcionan por radiofrecuencia en vez de la conexión celular que ofrece los S373 (aunque también es compatible con estos) y puede transmitir toda la información de una manera segura.

Escenario 2: Desarrollo de sistema de adquisición de datos SADA junto con equipos de automatización y control

- **BAS por medio de S272**

Debido a que los Gateway S373 y S281 solo están diseñados para adquisición de datos, las RTU S272 generan una oportunidad para emprender el camino hacia los sistemas que también puedan tener labores de automatización y control, como se puede observar en la Figura 3-16.

Figura 3-16. Propuesta de sistema de adquisición de datos con automatización y control (BAS) de algunos equipos del campus la Nubia. **Fuente:** Elaboración propia.

Los RTU S272 pueden ejercer algunas labores de control y automatización en dispositivos que se conecten a él por medio de comunicación celular a través de la App para dispositivos móviles (para controlar desde Smartphone) nube o el software que da el fabricante, a pesar de esto no cuenta con la capacidad de comunicación con unidad central de adquisición de datos puesto que no cuenta con puerto ethernet LAN/WAN ni satelital. Por ello, como se muestra en la Figura 3-16 se puede pensar en integrar estos dispositivos con los Gateway S373 por medio de RS485 (donde el Gateway sea el maestro y el S272 el esclavo) para poder realizar algunas las labores de control o automatización (encendido

o apagado de máquinas, abrir o cerrar puertas, accionar interruptores, entre otros) al mismo tiempo que se transmite la información vía LAN/WAN o celular.

En resumen, el campus puede tener un sistema de adquisición de datos como el de la Figura 3-14 donde se añadan estos equipos de control y automatización en algunos dispositivos de los bloques que se puedan manipular centralizadamente desde la unidad de computo dispuesta en el S1 – 103. Lo anterior abre el camino a futuros proyectos de sistemas BAS que se realicen en la universidad.

Si se deseara tener el sistema de control/automatización BAS que ofrece la conexión de maestro/esclavo del S373 y el S272 para redes LoRa se utilizaría el esquema de la Figura 3-17.

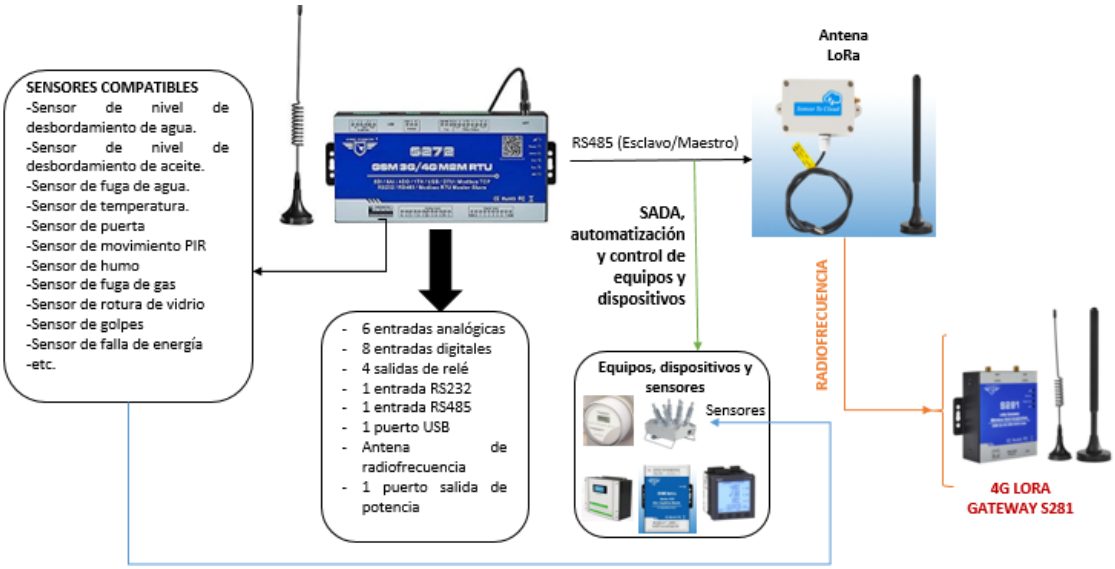


Figura 3-17. Propuesta BMS con automatización y control (BAS) de algunos equipos del campus la Nubia por medio de redes LORA. **Fuente:** Elaboración propia.

La Figura 3-17 describe la misma posibilidad de conexión de S272 con el S373 descrito en la Figura 3-16 pero en vez de utilizar de maestro el S373 se conectara por medio de RS 485 una antena LoRa que estaría trasmitiendo por radiofrecuencia la información de los dispositivos conectados al Gateway S281, el cual a su vez puede enviar la información a un servidor de cómputo central. Esta configuración se puede utilizar de la misma manera que se hace en la Figura 3-15 en todos los bloques analizados del campus para tener un sistema BMS que pueda realizar labores de automatización y control (BAS) que sea

independiente a las redes celulares, usando una red de radiofrecuencia local mucho más segura y con la posibilidad de conectar muchos dispositivos y equipos.

Estas nuevas tecnologías que se instalen en una institución educativa como el campus La Nubia ayudarán a realizar investigaciones referentes al desarrollo de ciudades inteligentes a pequeña escala desde los campus.

Nota: Se deben desarrollar interfaces de programación de aplicaciones (API por sus siglas en inglés) que integren los datos arrojados por todos los equipos en sus diferentes plataformas y lo unifiquen en una interfaz de programación única, con un diseño de dash boards y pestañas que muestren de manera clara y resumida todos los datos que se adquieran con el sistema de adquisición de datos, control y automatización que se diseñe.

A la larga, los sistemas BMS y BAS que permitan alcanzar estándares NZEB deberán ser capaces de controlar y monitorizar desde una unidad de cómputo central todos los activos energéticos de los bloques de la universidad, como los arreglos PV, el sistema de baterías, los sensores, actuares, relés interruptores, generación Diésel, reconectador, entre otros.

Para ello, los escenarios BMS y BAS propuestos en esta tesis deberán acoplarse también con plataformas que se encarguen de gestionar y controlar datos; es decir, que por medio de lenguajes de programación o códigos se enlace la información obtenida a partir de los modelos propuestos en GESDELEC y se puedan visualizar en diferentes interfaces gráficas o dash boards que ofrecen algunas compañías. Cabe recordar que los equipos de King Pigeon adquiridos en GESDELEC cuentan con soporte en la plataforma KPIIOT y el analizador de redes en la plataforma SARA CLOUD; a pesar de esto, estas plataformas no dan muchas posibilidades en cuanto a gestión de la información de la demanda del campus.

Por ello, lo ideal sería pensar en otras plataformas como como UBIDTOS y *Amazon Web Services* (AWS), las cuales ofrecen muchas más posibilidades para la gestión de la información recogida por los equipos. Por eso se deben de desarrollar interfaces de programación de aplicaciones (APIs) que integran los sistemas de adquisición de datos de los equipos con plataformas de gestión de la informan para acercar más al campus a BMS – BAS y por ende a NZEB.

3.3.5 Sistema de almacenamiento de energía

Para poder alcanzar el estándar NZEB se debe de tener un sistema de baterías que permita almacenar la energía sobrante en los picos de generación del sistema solar fotovoltaico para poder ser utilizada en situaciones específicas, como picos de demanda, tiempos de clima complicado para generación PV, las noches, entre otros y también utilizaciones particulares como movilidad eléctrica, alimentación de alumbrado público, alimentación de sistemas de iluminación interna, etc. Además, deben tener la posibilidad de poder entrar a alimentar demanda en situaciones de desconexión de la red eléctrica local para tener un funcionamiento autónomo o como isla por medio el sistema solar fotovoltaico y trabajar conjuntamente con los grupos electrógenos de respaldo, con la ayuda del sistema de almacenamiento que se tenga en el campus la Nubia.

3.4 Positive Energy Buildings - PEB

Los PEB son el último eslabón en la búsqueda de desarrollar edificaciones ZEB a un máximo nivel, por lo que en la clasificación de ZEB descrita en la Figura 3-2 representan el largo plazo para el campus la Nubia. Sin embargo, suponiendo que el campus se encuentra en un estado PEB (posibilidades de exportar excedentes eléctricos a la red) se analiza en esta sección la entrada de los PEB al Mercado eléctrico colombiano y sus variables normativas y técnicas (como servicios complementarios o de soporte técnico) que se deberían de considerar en escenarios de corto, mediano y largo plazo a manera de mapa de ruta, como se muestra en la Figura 3-18.

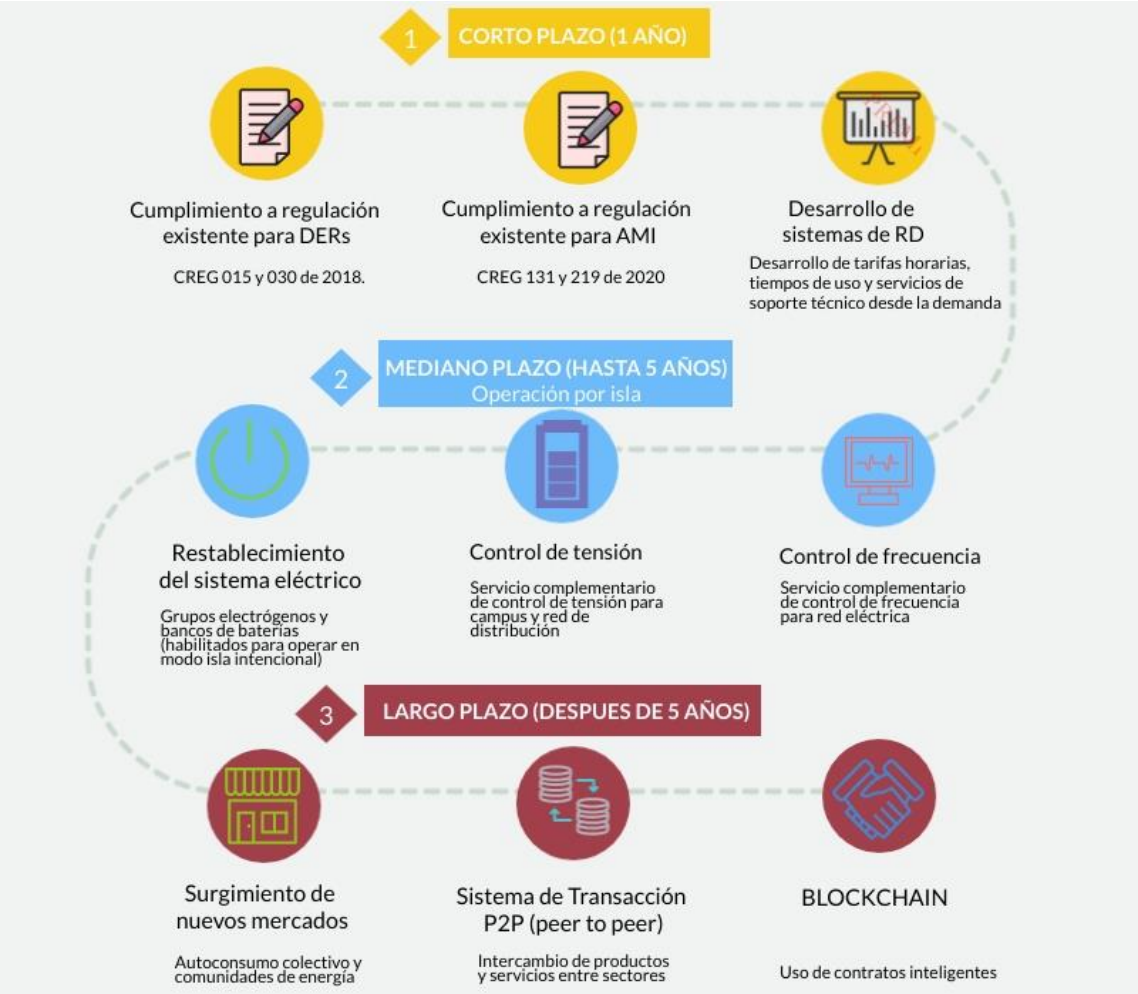


Figura 3-18. Mapa de ruta PEB propuesto. **Fuente:** Elaboración propia

Corto plazo

Regulatoriamente en Colombia existe la Comisión de Regulación de Energía y Gas – CREG, la cual reglamenta y dictamina varias regulaciones y normativas referentes al sector en la energía eléctrica, para el caso de los PEB se deben de tener en cuenta las CREG 015 y 030 de 2018 y las CREG 131 y 219 de 2020.

La CREG 015 establece la metodología de remuneración de la actividad de energía eléctrica en el Sistema Interconectado Nacional – SIN y las CREG 030 de 2018 regula las actividades de autogeneración a pequeña escala y de generación distribuida en el SIN. Debido a que las PEB utilizan autogeneración a pequeña escala por medio de generación de distribuida y además necesitan una metodología de remuneración deben de acoplarse a estas resoluciones, ya que de allí se dictaminan las condiciones de funcionamiento y la interacción conjunta de las PEB con los operadores de red que manejan las redes eléctricas de distribución local. Para el caso del campus el operador de red es la CHEC de EPM, así que, por medio de la resolución CREG 030 de 2018 la universidad puede producir su propia energía para reducir consumos, reduciendo igualmente el precio a pagar en la factura de servicio además de la posibilidad de vender excedentes energéticos a la red, que es la finalidad de las PEB.

Por otra parte, las resoluciones CREG 131 y 219 de 2020 establecen las condiciones para la implementación de Infraestructura de Medición Avanzada – AMI en el SIN (modernización de la red). Estas resoluciones generan oportunidades a las PEB de acoplarse con sistemas inteligentes en las redes de distribución; para el caso del campus, representa las posibilidades de conexión y comunicación entre los sistemas BMS y BAS que se integren en el campus junto con las redes AMI con las que cuenten los operadores de red.

Con base en las regulaciones anteriores, también es pertinente el desarrollo de tarifas horarias, tiempos de uso y servicios de soporte técnico desde la demanda; como por ejemplo el diseño de sistemas de respuesta de la demanda en los que los PEB que puedan satisfacer por medio de sus excedentes energéticos las necesidades o problemas de las redes eléctricas locales, ayudando a aplanar la curva del sistema ya sea en picos o déficits energéticos.

Los PEB pueden servir como un servicio complementario para los operadores de red en términos de confiabilidad del sistema. Desde el campus la instauración de tarifas horarias puede generar hábitos de consumo que se adecuen a las necesidades de las redes eléctricas locales, respaldado por los DERs que se instauren en el campus (gestionados por los BMS y BAS) y SGEn que se desarrollen. En cierto modo, pensar en un campus PEB complementaria la modernización de las AMI en las redes de distribución siendo más eficientes y confiables por medio de la posibilidad de que el campus pueda prestar servicios complementarios [94], [160].

Mediano plazo

Otros servicios de soporte técnico desde la demanda que podrían ofrecer los PEB es por medio de la operación por islas que son posibles a través de los DERs en términos de servicios complementarios como, por ejemplo: control de frecuencia, control de tensión y restablecimiento de la red eléctrica.

La operación por isla se define como la capacidad de una fracción del sistema para operar autónomamente en caso de una falla o mantenimiento, conservando los niveles de calidad, seguridad y confiabilidad en el suministro de energía. Por otra parte, el arranque autónomo en condiciones de operación por isla se puede realizar por medio de los grupos electrógenos o bancos de baterías con los que cuente el campus en un estado PEB. Es decir, en el futuro el diseño de edificaciones PEB como el campus la Nubia deben considerar todas las condiciones técnicas como protecciones, sistemas de puesta a tierra, sistemas de control robusto y balance entre generación - demanda para tener una correcta operación por isla, la cual, cuenta con beneficios como: aumento de la resiliencia el sistema, aumento en la flexibilidad de la operación, aumento en la confiabilidad, posibilidad de participar en programas de respuesta a la demanda y provisión de servicios complementarios al sistema interconectado [161].

Largo plazo

El desarrollo de las tecnologías PEB supondrá en el futuro oportunidades de negocio para instituciones como el campus la Nubia, por ejemplo, en términos de autoconsumo

colectivo. En estos mercados se pueden agrupar más de dos edificaciones PEB que, por medio de un trabajo conjunto y simultaneo satisfagan las necesidades energéticas de las demás edificaciones. En el campus por ejemplo, los bloques PEB se pueden complementar debido a que todos tienen diferentes usos de la energía y por ende los máximos eléctricos de los DERs de un bloque pueden satisfacer los déficits del otro, así como los picos de consumo de un bloque pueden ser alimentados por otros bloques que se encuentren en valles o en situaciones de poca demanda eléctrica [4].

El término de autoconsumo colectivo también se puede aplicar a diferentes tipos de consumidores como por ejemplo conjuntos residenciales, edificios, manzanas e incluso localidades como barrios o comunas. También se podría pensar en operación conjunta con edificios residenciales y comerciales, o mercados con usuarios residenciales, entre otros. En definitiva, lo que se debe asegurar es juntar usuarios PEB con diferentes características de demanda y separar los que tengan curvas de demanda similares. Esto asegurara que unos se complementen con los otros y los DERs de cada edificación junto con todas las medidas de diseño pasivo y activo a nivel PEB garanticen un balance energético a nivel cero con la posibilidad de exportar excedentes eléctricos a la red o a usuarios cercanos.

La agrupación de usuarios para autoconsumo puede generar el término de comunidades energéticas, donde grupos de usuarios se puedan complementar los unos con los otros por medio de micro redes y redes inteligentes que aseguren la correcta gestión energética en el escenario PEB, lo que garantizará un alcance más amplio para el autoconsumo de las edificaciones, con perspectivas al desarrollo de comunidades inteligentes o ciudades inteligentes de autoconsumo, siendo el campus un laboratorio a pequeña escala para ello.

Estos modelos de mercado basados en comunidades energéticas se pueden sostener por medio del Sistema de Transacción P2P (Peer to Peer por sus siglas en inglés). El P2P se basa en el intercambio de productos y servicios entre el sector eléctrico y otros sectores mediante sistemas de valores digitales; es decir, los usuarios finales pueden transar energía entre ellos y los operadores de red por medio de los DERs, convirtiéndose en prosumers (consumidores que producen y consumen) al mismo tiempo que generan, almacenan, venden o compran energía usando tecnologías digitales, incluyendo el Blockchain, gráfico a cíclico dirigido, computación en la nube y sensores de ahorro de costos [162]. En otras palabras, el comercio de energía P2P representa una forma

descentralizada de los mercados energéticos existentes con nuevas propuestas tanto en diseño como en operación [163].

Para ello se hace necesario la modernización de las redes de distribución por medio de AMI y la actualización de las edificaciones en redes inteligentes por medio de BMS y BAS como se ha mencionado anteriormente, puesto que el mercado eléctrico por medio de P2P necesitara disponibilidad de la información cercana a la operación para trabajar en tiempo real. Los operadores de red no son ajenos a estos nuevos modelos de mercado, puesto que están implementando sistemas que permiten a los micro generadores vender su electricidad directamente al usuario residencial por medio de las plataformas P2P [164]–[166].

Estas iniciativas usan tecnología blockchain mediante el uso de contratos inteligentes para resolver la negociación sin un centralizador ni intermediarios de dichas operaciones. Estas nuevas tecnologías que se basan en la digitalización han transformado los roles en la cadena de valor del sector eléctrico [167].

Por ende hay que visualizar la incursión en el mercado de las ZEB a largo plazo por medio de P2P, las cuales están empezando a incursionar en Colombia, con proyectos piloto en localidades como en algunos barrios de Medellín [168]. Por ello la viabilidad de las PEB dependerá de modelos de negocio basados en P2P donde los usuarios como el campus la Nubia sean no solo elementos activos de la red eléctrica de distribución si no también pequeñas células de despecho que influyan en las variables económicas del mercado de energía eléctrica [168].

4. Conclusiones y trabajos futuros

En este capítulo se presentan las principales conclusiones y contribuciones de la tesis, se proponen trabajos futuros y se menciona la difusión académica de la tesis.

4.1 Conclusiones generales

En esta tesis se evaluaron criterios para promover las edificaciones de balance energético cero en el sector terciario de Colombia. Los escenarios planteados (LEB, nZEB, NZEB y ZEB) para el análisis representan propuestas de diseño activo y pasivo para disminuir los consumos eléctricos de las edificaciones, además de contener estrategias de SGEn, propuestas metodológicas para evaluación de edificios y hojas de ruta para la inserción de usuarios autogeneradores a pequeña escala en los mercados de energía eléctrica, entre otros.

Los criterios evaluados en esta tesis pueden representar el primer paso para que las entidades gubernamentales o grupos de investigación puedan desarrollar mecanismos de promoción o generación de incentivos para las edificaciones de balance energético cero en Colombia. De igual manera esta tesis representa una revisión exhaustiva de los ZEB tanto en el mundo como en Colombia para generar conocimiento referente a estas tecnologías emergentes.

Las conclusiones generales encontradas en esta tesis de maestría son construidas a partir de los objetivos específicos propuestos, que recogen el objetivo general. A continuación, se lista cada objetivo específico y posteriormente se explican los resultados y aportes obtenidos.

Objetivo específico 1:

"Analizar experiencias internacionales donde se promueva el diseño de edificaciones sustentables

- Se realizó una revisión crítica del estado del arte referente a los criterios de definición para el diseño de edificaciones sustentables y a partir de este análisis se determinó que existe falta de uniformidad a nivel internacional para la definición general de las ZEB y su aplicación en cada territorio debido a las diferentes condiciones técnicas, económicas, geográficas de cada país.

- Se encontró, a partir de la revisión bibliográfica realizada en esta tesis, que en Latinoamérica ningún país tiene una política concreta para incentivar el diseño y construcción de edificaciones ZEB en sus territorios y solo el 14% de los países que conforman la región han avanzado en iniciativas claras que promuevan el continuar en la línea de incentivar edificaciones sustentables tipo ZEB. Por eso el análisis de la normativa actual en ZEB tiene el propósito de que los países emergentes como Colombia 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. En el país, por ejemplo, existe la ley 549 de 2015 la cual abre el camino hacia edificaciones sustentables por medio de técnicas activas y pasivas de diseño para diferentes tipos de edificaciones y climas. No obstante, solo se pueden alcanzar ahorros de energía de hasta un 45%. Lo anterior acerca al país al escenario LEB, pero no llegan a los estándares que se pretenden alcanzar en nZEB, NZEB y PEB, por lo que se necesita desarrollar nuevas y mejores normativas.

Objetivo específico 2:

"Determinar desafíos, oportunidades y retos futuros para incentivar edificaciones de balance energético cero."

- 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. Estas oportunidades se tratan en esta tesis por medio de la utilización de redes inteligentes para comunidades ZEB y campus universitarios ZEC. La investigación en estas edificaciones servirá para el desarrollo de futuras ciudades inteligentes ya que se tienen diferentes estructuras con diferentes usos de la energía, lo cual las hace laboratorios a pequeña escala donde edificaciones con diferentes características, ya sean nuevas o existentes interactúan entre sí para lograr alcanzar consumos que cumplan con los escenarios de ZEB. Según los antecedentes y estado del arte revisados en esta tesis los objetivos ZEB son posibles y esto se demuestra en los resultados obtenidos en el desarrollo del objetivo específico 3.

- Los modelos de negocio que se creen a partir de los ZEB, deben ser sectorizados según el nivel de ingresos de la población objetivo para que sean competitivos y asequibles. Adicionalmente, se identificó que es necesario invertir en el desarrollo del 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.

- En la presente tesis se observa una tendencia en la que las ZEB serán el futuro de las edificaciones en todo el mundo ya que su aplicación en todos los sectores de consumo repercutirá positivamente en la lucha contra el cambio climático,

- Las ZEB 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, redes AMI y demás tecnologías que aporten a un desarrollo sostenible e integral para la sociedad en general.

Objetivo específico 3:

"Establecer criterios que permitan impulsar las edificaciones sustentables en el sector terciario en Colombia."

- Se estableció que el escenario (LEB) es alcanzable a partir de la normativa existente en Colombia, específicamente desde las exigencias de reducciones en el consumo de energía eléctrica por tipo de edificación y tipo de clima descritas en la resolución 549 de 2015 y por las medidas de diseño pasivo y activo recomendadas en la guía de ahorro de agua y energía para cumplir dichas exigencias. En esta tesis se realizó un ejercicio de aplicación de dicha normativa con base en las estimaciones de consumo de los bloques del campus La Nubia de la Sede Manizales y se determinó un estado actual aproximado de las instalaciones que evidencia que solo existen 4 bloques (L, S1, S2 y W) con consideraciones de diseño bioclimático, diseño pasivo y diseño activo, los cuales están cercanos a ser LEB. Por el contrario, el resto de edificaciones debido a su grado de antigüedad, materiales y tecnologías poco eficientes deben de aplicar las recomendaciones descritas en la guía de ahorro de agua y energía. Por lo anterior, se ve la necesidad de contar con sistemas más precisos de gestión de la demanda, donde el campus pueda obtener más fácilmente los datos de consumo reales y así poder desarrollar sistemas de gestión de energía o estudios como el de la presente tesis.

- De acuerdo con lo anterior, se desarrolló una propuesta de metodología para una evaluación energética de edificios LEB que se puede aplicar a cualquier tipo de edificación bajo el análisis de los siguientes criterios: recolección de información, diagnóstico y caracterización, estimación de cargas y recomendaciones futuras. La recolección de la información consta de revisar estudios de caso de ZEB o

edificaciones sustentables realizados en la zona o en el país, juntos con la revisión de antecedentes normativos y el estado del arte de las ZEB. Luego, el en diagnóstico y caracterización se revisará el estado actual del caso de estudio en cuanto a sus redes eléctricas y de comunicación existente y el estado de longevidad del edificio. Después, en la estimación de cargas se hará uso de los datos de consumo e indicadores disponibles para determinar la energía eléctrica demandada por el caso de estudio si es posible, si no, se establecen los consumos estimando de los datos que estén existentes se utilizará como referencia la guía de ahorro de agua y energía. Por último, en la fase de recomendaciones futuras se evaluarán los indicadores y resultados para determinar posibles planes a seguir para mejorar el rendimiento energético del edificio como aplicación de las recomendaciones realizadas por resolución 549 de 2015, desarrollo de SGEn o programación de auditorías internas. A partir de esta propuesta metodológica de evaluación energética para edificios LEB se logró estimar el estado actual del estudio de caso en lo referente al consumo de energía de los bloques del campus. Sin embargo, tanto la propuesta como los resultados son estimados y pueden representar márgenes de error considerables. Lo anterior debido a que la situación de la pandemia repercutió en algunas restricciones para realizar visitas técnicas al campus y en la fiabilidad de los datos actuales, ya que no hay regularidad académica y, por ende, los datos del consumo que se podían extraer de los equipos no son cercanos a la realidad. Aun así, los cálculos realizados para la estimación de cargas pueden servir como formas alternativas para la obtención de datos la demanda eléctrica de los bloques del campus.

- Se realizó la evaluación para que el estudio de caso pueda alcanzar una condición nZEB a mediano plazo por medio del dimensionamiento de un sistema solar fotovoltaico que genere de un 60% a un 75% de ahorros eléctricos con respecto al consumo base del campus. A este nivel se puede ver que el campus cuenta con el área disponible y condiciones climáticas idóneas que pueden alcanzar dichos niveles de ahorro, además, a través de la ubicación optima de sistemas PV se logra identificar el caso con menores perdidas eléctricas del sistema, dicha condición resulta de obtener menos perdidas cuando se ubican de manera distribuida en diferentes bloques.

- Para alcanzar un estado NZEB (100% de ahorro eléctrico) se determinó que se deben desarrollar sistemas de adquisición de datos que puedan tener labores de automatización y control, basados en BMS y BAS y que estén acoplados a las medidas de diseño pasivo y activo previstas en los escenarios LEB y nZEB. Lo anterior permite tener reducciones en el consumo del caso de estudio para ser considerado una edificación de balance energético cero a largo plazo. Los escenarios de BMS y BAS representan el primer paso para lograr bloques inteligentes que puedan gestionar su demanda de manera eficiente y centralizada, lo que abre camino hacia futuras investigaciones sobre campus ZEB. En este escenario se determina que, en el campus, con el nivel de comunicaciones actual, equipos existentes y los equipos adquiridos en el proyecto GESDELEC se desarrollaron modelos de adquisición de datos que pueden controlar y automatizar algunas de las variables eléctricas de los bloques como sensores, actuadores, relés, entre otros. A pesar de esto, lo desarrollado en esta tesis en cuanto BMS y BAS es básico y se deben desarrollar modelos más precios que maximicen la posibilidad de gestionar las variables eléctricas de la red local del edificio.

Recomendaciones:

- Para lograr el nivel PEB se debe lograr un conjunto de tecnologías de energía renovable, almacenamiento y redes inteligentes en un máximo nivel y, por lo tanto, tener la oportunidad de exportar activos energéticos a la red eléctrica local. Además, es necesario que el edificio cuente con una buena sincronización de todos sus equipos, dispositivos, sensores, y demás con la red central para que a partir de ahí se pueda gestionar el sistema total de forma eficaz y se puedan desarrollar modelos que optimicen el consumo del campus, como que el sistema solar fotovoltaico se adapte a las condiciones climáticas locales y puede almacenar el exceso de energía para ser utilizada en épocas de baja radiación solar o en días de lluvia. Para ello en esta tesis se desarrolló una hoja de ruta desde el punto de vista del mercado para la inserción de los PEB, donde se concluye que a corto plazo estas edificaciones deben acoplarse a las normativas existentes de

autogeneración, DERs, AMI y RD. Luego, a mediano plazo deben tener un desarrollo técnico que les permita ofrecer servicios complementarios y de soporte técnico en operación modo isla. Por último, a largo plazo se tiene que facilitar normativas de transacción y comercialización de energía como P2P por medio de Blockchain donde las PEB además de ser elementos activos de la red puedan tener beneficios remunerativos por su funcionamiento.

- Los niveles de eficiencia energética dependen de muchas variables e incentivos que alienten y aseguren el posicionamiento de las ZEB en los mercados de energía de los países. A pesar de esto, existe evidencia del éxito en la literatura sobre el estado del arte de las ZEB que, además de ser edificaciones sostenibles que aportan a los problemas actuales del medio ambiente también sirven como solución o alternativa energética para diversificar la matriz eléctrica en los mercados de energía. En el caso de los PEB, las edificaciones ya sean del sector terciario o residenciales pueden ser parte activa en las redes de distribución (prosumers) que pueden aportar en términos de confiabilidad eléctrica y competencia en el mercado eléctrico, lo que puede generar un desarrollo tecnológico y económico en el negocio de la ingeniería eléctrica. Sin embargo, se debe intensificar más la investigación de las ZEB y sus variables técnicas y normativas ya que es un concepto que, a pesar de estar desarrollado fuertemente a nivel europeo, norteamericano y asiático, aún no cuenta con programas o planes a nivel latinoamericano.

- Técnicamente es posible alcanzar los niveles de ZEB en instituciones educativas como el campus la Nubia. A pesar de esto, se necesitan políticas de incentivos y normativas que tengan regulaciones, resoluciones o decretos que alienten y promuevan la introducción de estas tecnologías en el mercado de energía eléctrica colombiano. El desarrollo de las ZEB ayudará a mitigar desde la parte de las edificaciones los problemas ambientales y de aumento de la demanda eléctrica a nivel global que repercuten directamente en el calentamiento global y cambio climático.

4.2 Trabajos futuros

- Analizar el estado de las ZEBs en Latinoamérica para brinda una visión general del grado de incursión que tienen estas tecnologías en los países emergentes.

- Proponer modelos que permitan la celebración de contratos bilaterales entre el operador del sistema de electricidad y prosumers (PEB) para aumentar la diversidad y confiabilidad de las redes eléctricas de distribución.

- Desarrollar más el concepto de funcionamiento en modo isla para el caso del campus universitario ZEB desde el punto de vista de viabilidad técnica y económica.

- Desarrollar modelos de dinámica de sistemas donde se simulen las variables técnicas, económicas y ambientales que traen consigo la implementación de ZEB en los campus universitarios inteligentes y así, determinar si los ZEC son viables técnica y económicamente.

- Proponer modelos de BAS y BMS que trabajen conjuntamente con modelos de redes neuronales, big data, análisis predictivo y demás conceptos que aumenten las posibilidades en cuanto a gestión y automatización de los edificios.

- Desarrollar modelos más precisos económica y técnicamente sobre la instalación de DERs en programas computacionales como HOMER PRO.

- Proponer las creaciones de incentivos y normativas con base en las experiencias internacionales de ZEB para promover su integración en el territorio colombiano.

4.3 Difusión académica

- **Artículo publicado en revistas científicas:**

  Esta tesis cuenta con un artículo de revisión publicado en la revista indexada *IEEE Latin America Transactions,* categoría Q3.

  - ✓ Osorio Ruiz, S., Carvajal Quintero, S. X., & Marín Jiménez, J. D. (2021). *Zero Energy Balance Buildings: Definitions, Current Challenges and Future Opportunities*. *IEEE Latin America Transactions*, 100(XXX). *Retrieved from* https://latamt.ieeer9.org/index.php/transactions/article/view/5784

- **Difusión en eventos científicos:**

  Los resultados parciales de esta tesis cuentan con la participación en la décima versión del Simposio Internacional sobre Calidad de la Energía Eléctrica (X SICEL), por medio de la siguiente ponencia:

  - ✓ Osorio-Ruiz, S., Marín-Jiménez, J. D., & Carvajal-Quintero, S. X. (2021). *"Zero Energy Buildings: Colombian perspective"*. X Simposio Internacional sobre la Calidad de la Energía Eléctrica – SICEL en Colombia, 2021.

- **Participación en proyectos de investigación:**

  Parte de los resultados del caso de estudio en el escenario nZEB, sistemas BMS y BAS hacen parte del proyecto de investigación GESDELEC.

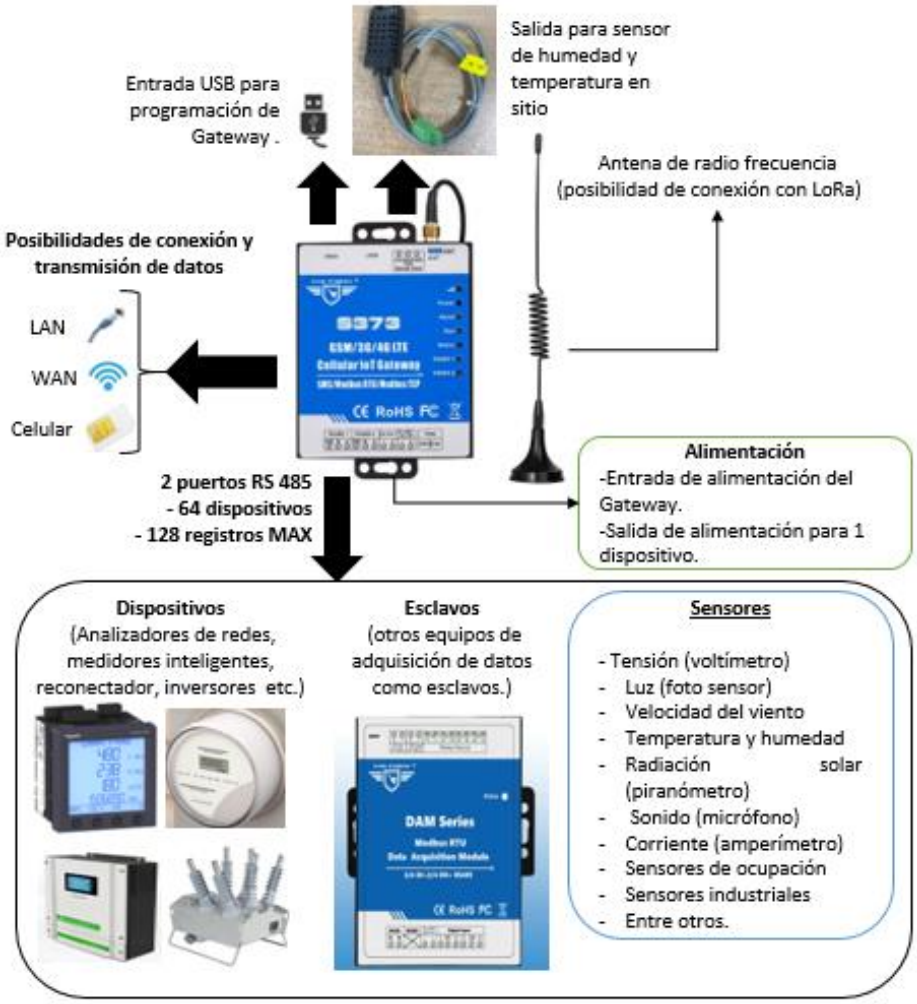
  - ✓ Osorio-Ruiz, S. & Carvajal-Quintero, S. X. (2021). "Laboratorio Gestión de la Demanda Eléctrica. GESDELEC". Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, campus la Nubia.

5. Anexos

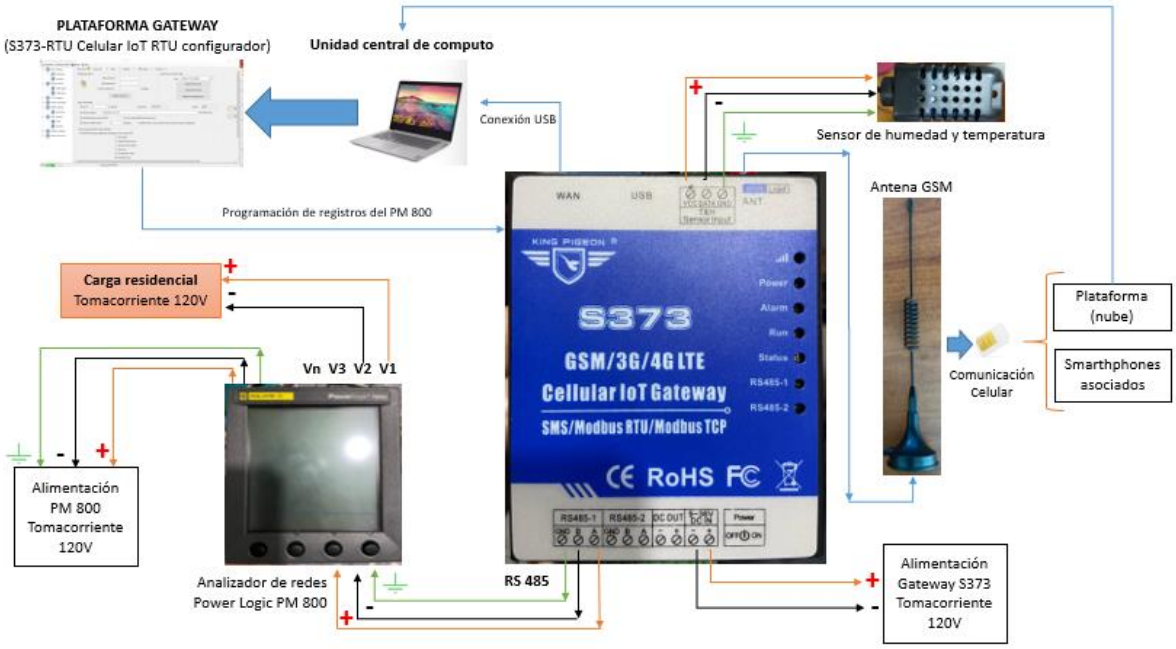
Anexo A: Instructivo de programación Gateway S373 conectado a analizador de redes Power Logic PM 800 y sensor de humedad y temperatura

1. Montaje del sistema de adquisición de datos

El Gateway S373 se puede conectar con 64 equipos por medio de RS485 y tiene la capacidad de registrar 128 datos, también tiene un puerto para la conexión de un sensor de humedad y temperatura como se muestra en la siguiente figura.

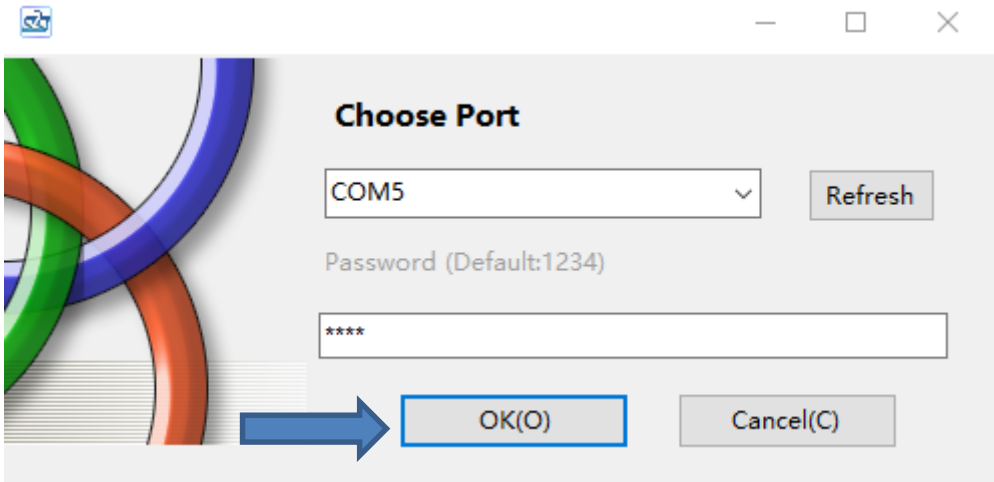


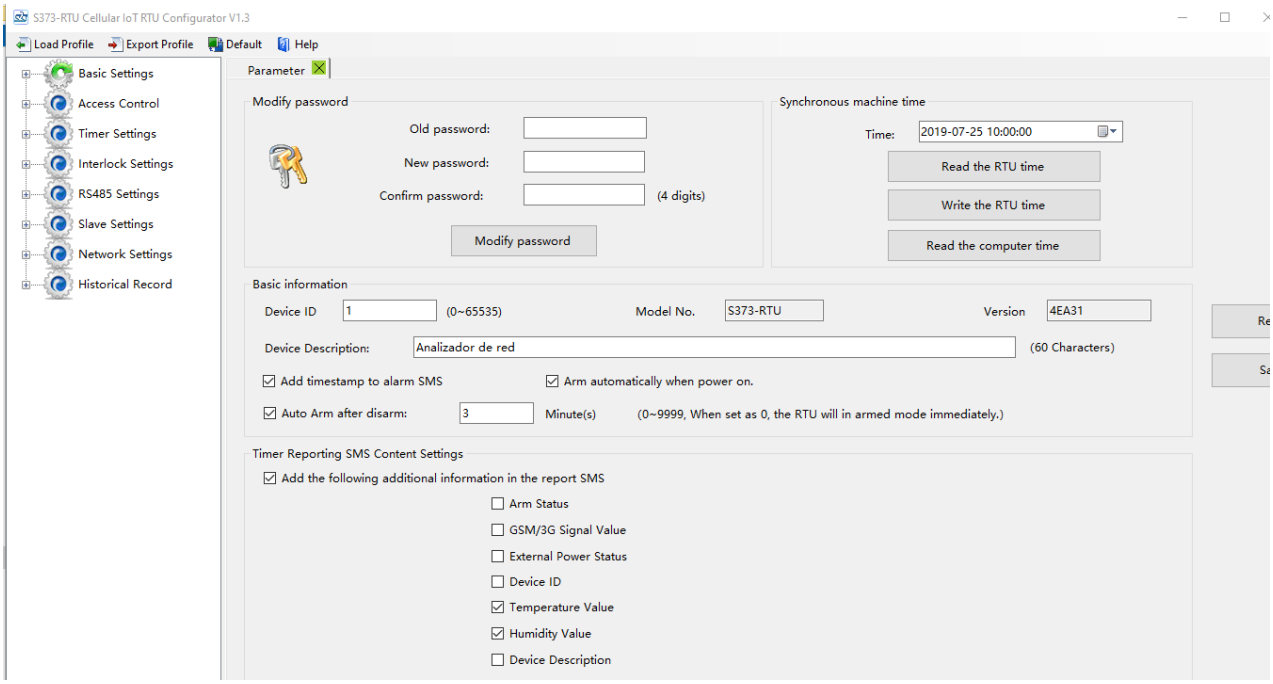
El analizador de redes PM 800 puede censar diferentes datos de potencia, demanda, tensiones y corrientes de la carga a la que se le instale. Este equipo se puede conectar con el S373 por medio de RS 485. A continuación, se mostrará la conexión de los equipos.



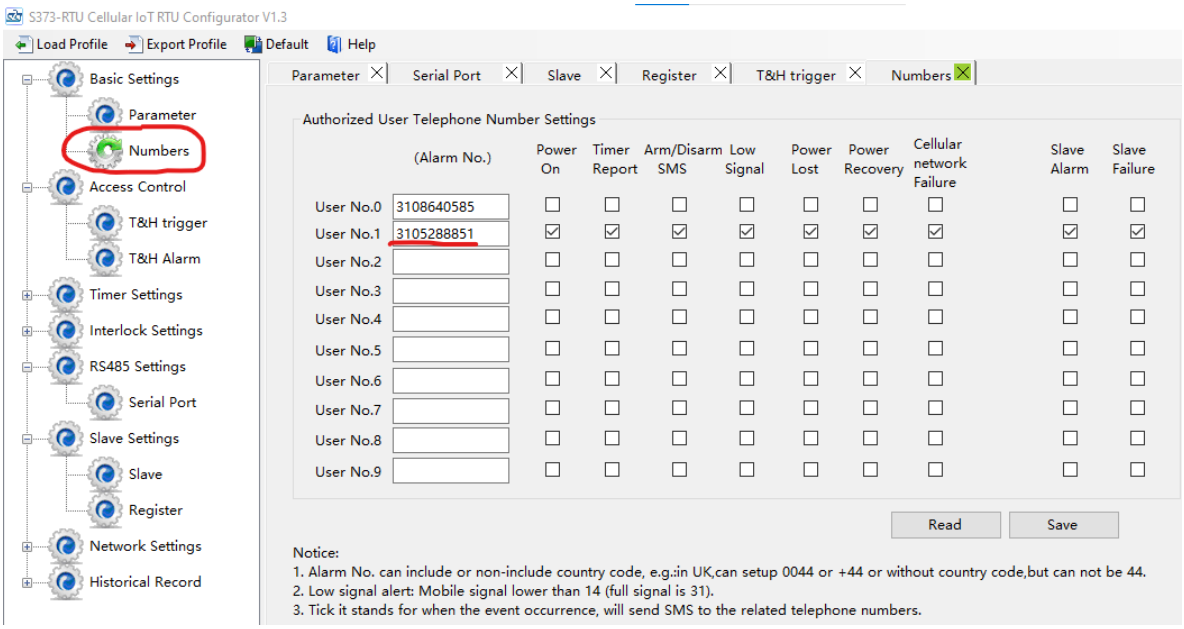
2. Programación del Gateway (esclavos, registros y dispositivos asociados)

Para programar los datos que se desean registrar en el Gateway se debe ingresar a la aplicación propia de la marca “S373-RTU Celular IoT RTU configurador”, se debe conectar por vía USB el Gateway con el PC, prender el Gateway y el programa lo detectara automáticamente.

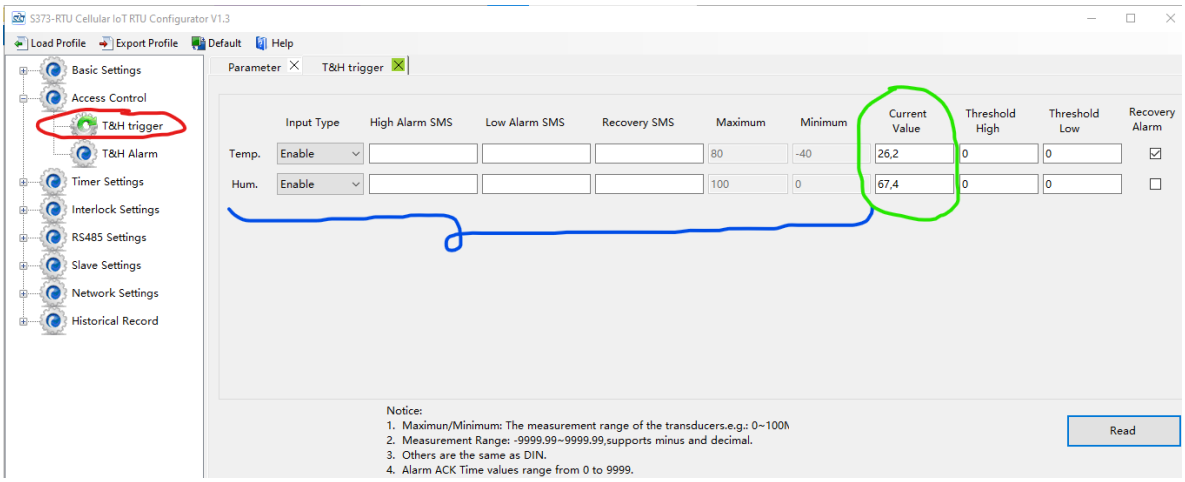




En la parte izquierda de la interfaz gráfica están las opciones de programación y configuración del dispositivo.

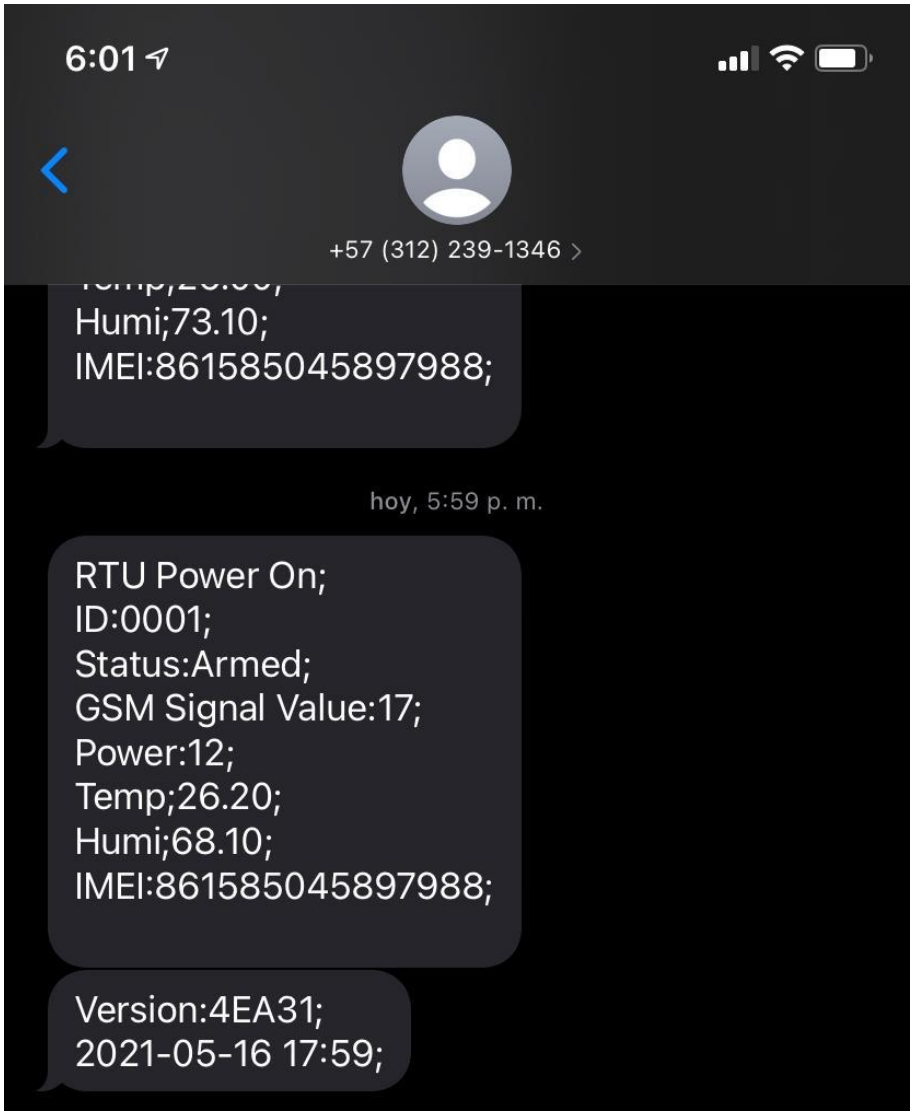


En las configuraciones básicas/números se pueden ingresar los números celulares que se desean añadir para recibir diferentes alertas o datos de los dispositivos que se encuentren conectados al Gateway.



En la sección de controles de acceso/T&H trigger se pueden visualizar los valores de temperatura y humedad arrojados por el sensor conectado al Gateway. Además, se pueden programar alertas o alarmas para valores mínimos o máximos y que estos lleguen a los dispositivos móviles celulares asociados.

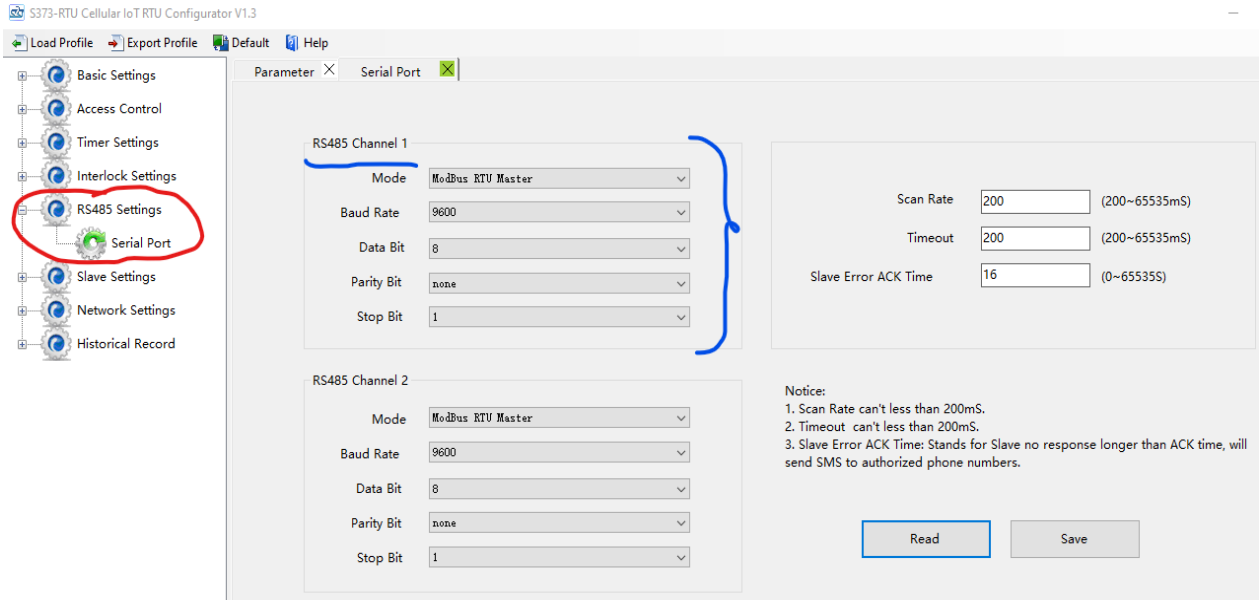
Nota: cuando se configuren los números en los que se desean recibir notificaciones de los Gateway, se recibirán los datos que se programen desde la plataforma vía SMS, como se puede observar en el siguiente pantallazo de un Smarthphone, el cual, es un mensaje que se envía desde el Gateway a los dispositivos asociados cuando el dispositivo es prendido.



El número del cual llega el mensaje de texto es el número de la SIM CARD que se le instalo al Gateway, es importante recordar que esta SIM debe de tener activo un plan de datos.

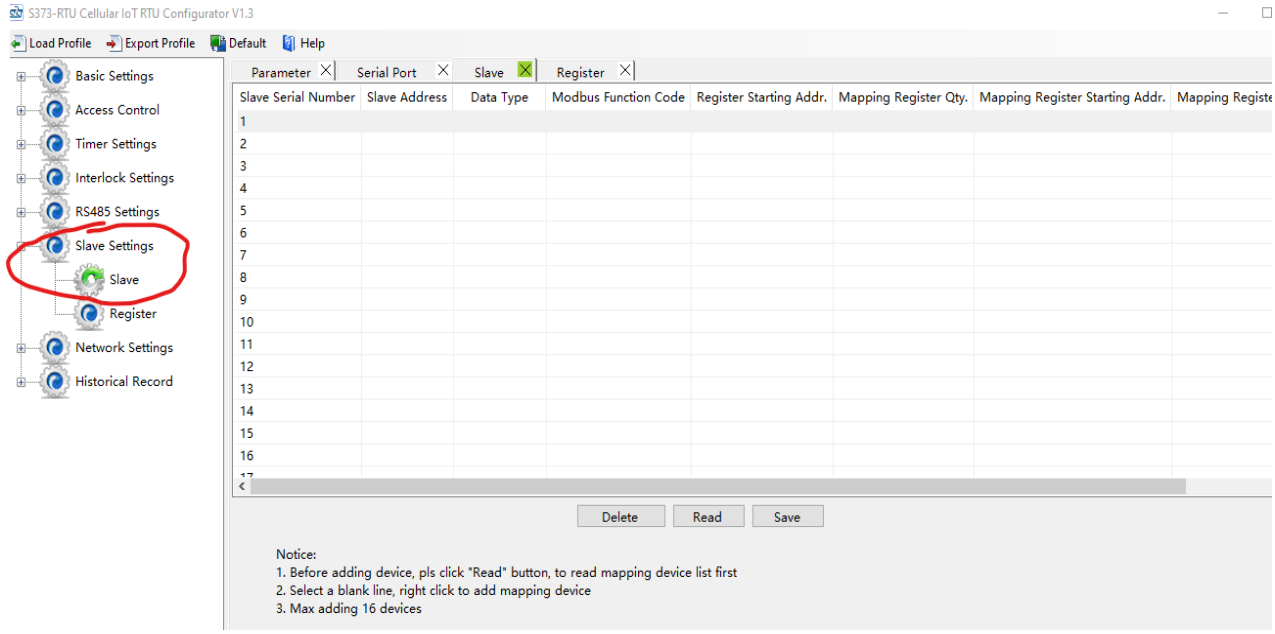
En la pestaña de configuraciones de tiempo se puede establecer periodicidad de lectura de datos entre otros.

Ahora bien, para la configuración del PM 800 conectado vía RS485 al Gateway se debe ingresar a la pestaña de configuraciones de RS485/puerto serial.

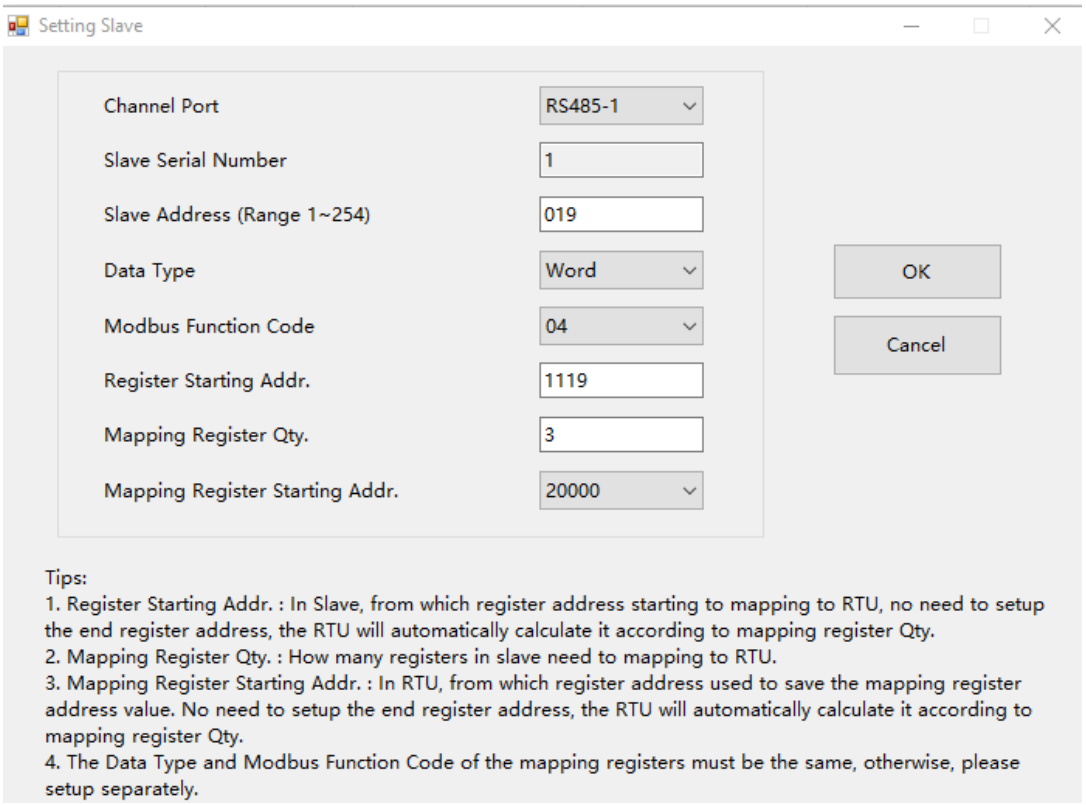


Allí se deberán configurar las opciones del canal 1, del cual está conectado el analizador de redes según se requiera, preferiblemente dejar configuración estándar.

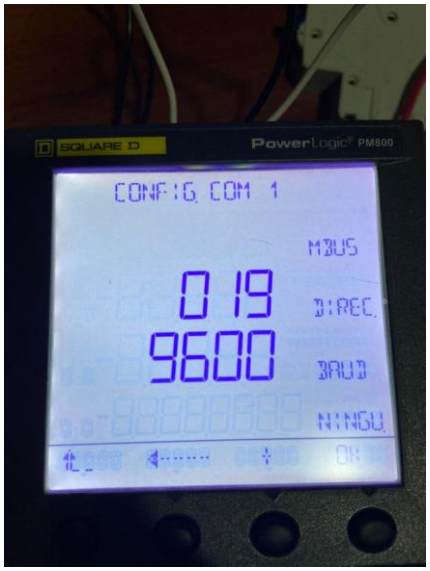
Para añadir los registros que se desean medir del analizador de redes se debe ingresar a las configuraciones de esclavo/esclavo.



Luego para ingresar un valor de registro se debe de dar clic derecho en cualquier numeral y adicionar esclavo, luego saldrá la siguiente ventana emergente:



En esta ventana se deberá dejar el canal 1 que es donde está conectado el PM 800, la dirección de esclavo se determinará desde el PM 800, en este caso se dejó la dirección 019 para el analizador de redes, como se muestra a continuación:



El tipo de dato se dejará en palabra, el código de función Modbus para palabras será el 3 o el 4 (en este caso se dejó el 4). El registro corresponde a la dirección del mapa Modbus que cada dato tiene, para esta prueba se registraran los siguientes valores de tensión:

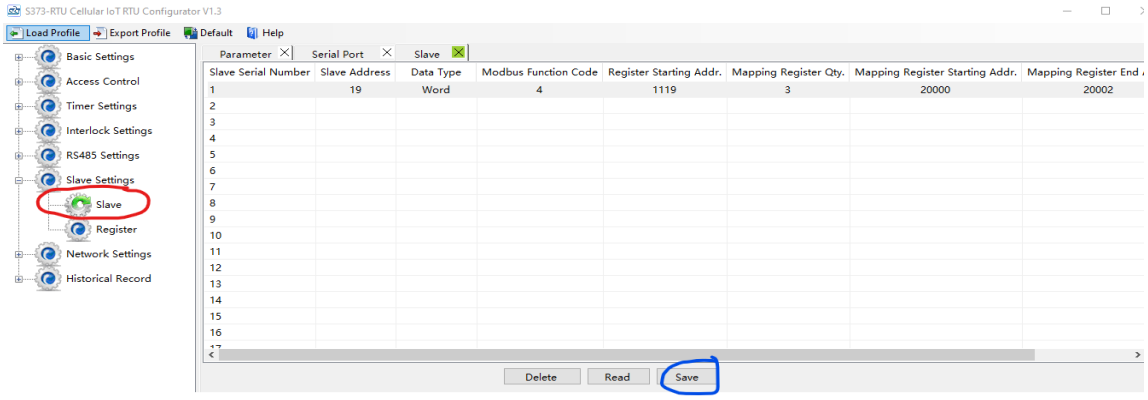
Nota: Los registros se extraen del manual de la lista de registros para el PM 800.

[1120] 1s Metering – Voltage

Reg	Name	Size	Type	Access	NV	Scale	Units	Range	Notes	PM	PM	PM	PM
1120	Voltage, A-B	1	Integer	RO	N	D	Volts/Scale	0 – 32,767	RMS Voltage measured between A & B	YP	YP	YP	YP
1121	Voltage, B-C	1	Integer	RO	N	D	Volts/Scale	0 – 32,767	RMS Voltage measured between B & C	YP	YP	YP	YP
1122	Voltage, C-A	1	Integer	RO	N	D	Volts/Scale	0 – 32,767	RMS Voltage measured between C & A	YP	YP	YP	YP

Por ello el registro empezará en la dirección 1120 y terminara en la 1122, ósea que se leerán 3 datos (en el espacio de mapa de registro) los cuales empezaran desde la numeración 20000 (por ser palabras). Luego en la ventana emergente de la configuración del esclavo se dará clic en OK.

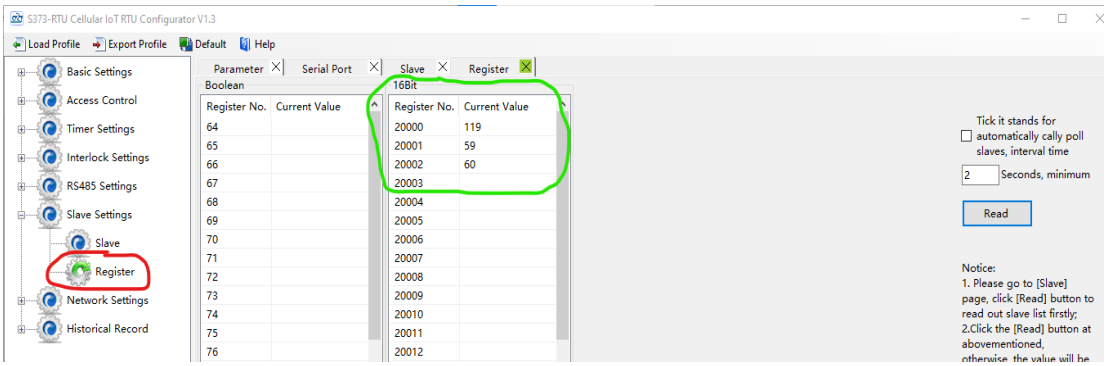
Nota: en algún momento de la simulación se desconfiguró el PM 800, por lo que los registros mostrados en su lista de registros se des configuraron de igual manera, de forma que quedaron uno hacia atrás (el registro 1120 es el 1119, el 1121 el 1120 y así sucesivamente).



En la ventana de esclavo se verá el resumen de la configuración añadida anteriormente, donde el esclavo añadido está en la dirección 19, el tipo de dato es palabra, la función del código Modbus es 4 (para palabras), el mapeo de registros será de 3 datos el cual empezará desde la posición 20000 y terminará en 20002 y el canal de RS 485 donde está conectado el esclavo es el 1. Luego se dará clic en guardar y se procederá a reiniciar el Gateway, lo anterior para que el dispositivo guarde sus cambios.

Una vez reiniciado el Gateway se dará clic en leer para comprobar que se guardó correctamente la configuración.

Luego se debe dirigir a la pestaña de configuraciones de esclavo/registro y leer los datos, los cuales aparecerán desde el número de registro 20000 al 20002, así:

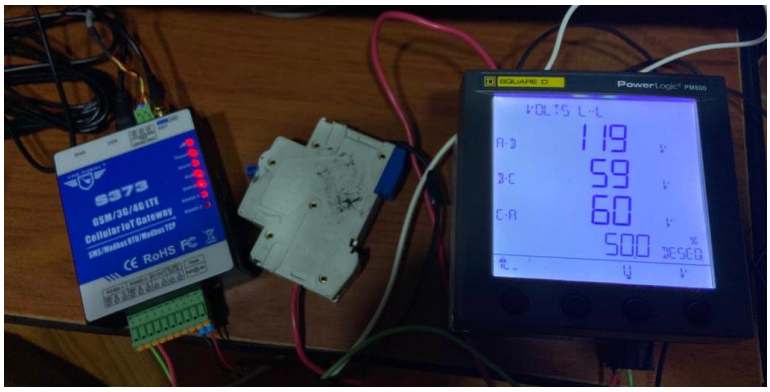


Se puede apreciar que el Gateway está extrayendo del analizador de redes los registros 1120, 1121 y 1122 los cuales corresponden respectivamente a tensiones A-B, B-C y C-A.

El analizador de redes tiene las salidas V1, V2, V3 y Vn. Cabe aclarar desde el esquemático de la conexión de los equipos que el analizador de redes está conectado

desde su salida V1 (A) a un puerto del tomacorriente y desde el puerto V2 (B) a la otra entada del tomacorriente (la salida V3 (C) no está conectado ni tampoco Vn); por ende, se escogen esos 3 registros desde el archivo de registros del analizador de redes (1120, 1121 y 1122). Las lecturas de tensión deberían ser las siguientes:

- Idealmente: A y B (V1=60V y V2=60V) = 120V; B y C (V2=60V y V3=0V) = 60V; C y A (V3=0V y V1=60V) = 60V.
- Mostrada en plataforma Gateway: registro 1120 (tensión entre A-B) = 119V; registro 1121 (tensión entre B y C) = 59V; registro 1122 (tensión entre C y A) = 60V.
- Mostrada en el Analizador de redes PM 800:

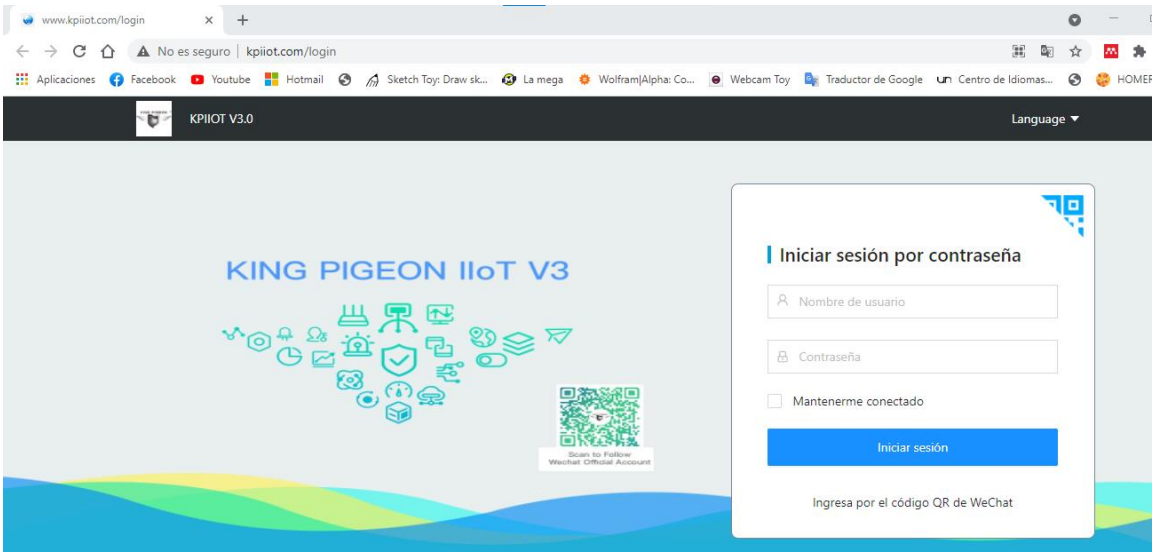


Se puede observar que las lecturas realizadas por el analizador de redes y las registradas en el programa del Gateway son las mismas. Todo lo anteriormente mostrado corresponde a la programación del Gateway en cuanto a asignación de dispositivos esclavos y registros que se desean leer para enviar la información a los dispositivos móviles asociados y la nube que aporta el fabricante para el equipo.

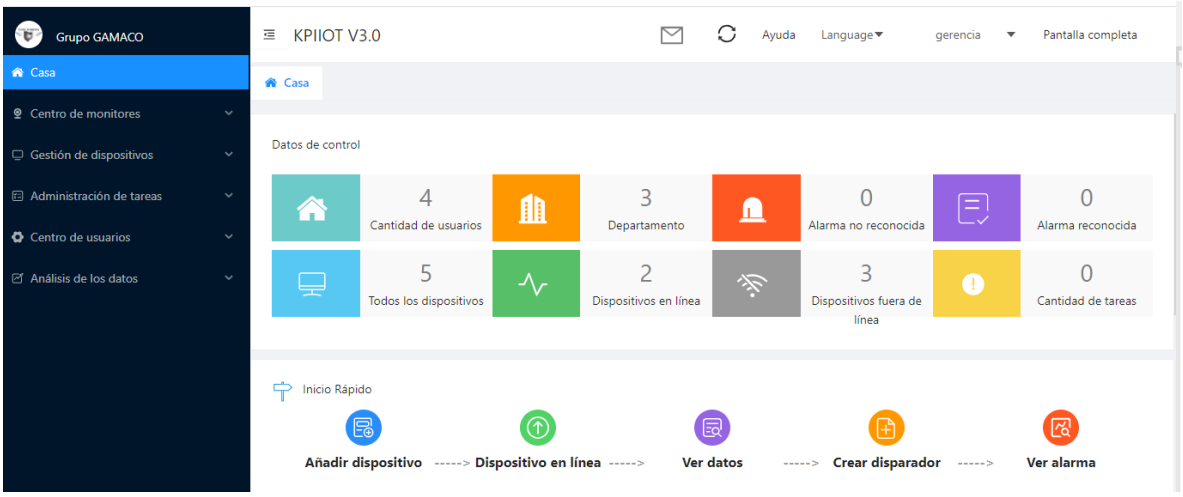
3. Visualización y gestión de datos desde la nube.

Para visualizar y gestionar la información que el fabricante dispone para los Gateway S373 se debe ingresar a la siguiente página Web: http://www.kpiiot.com/login.

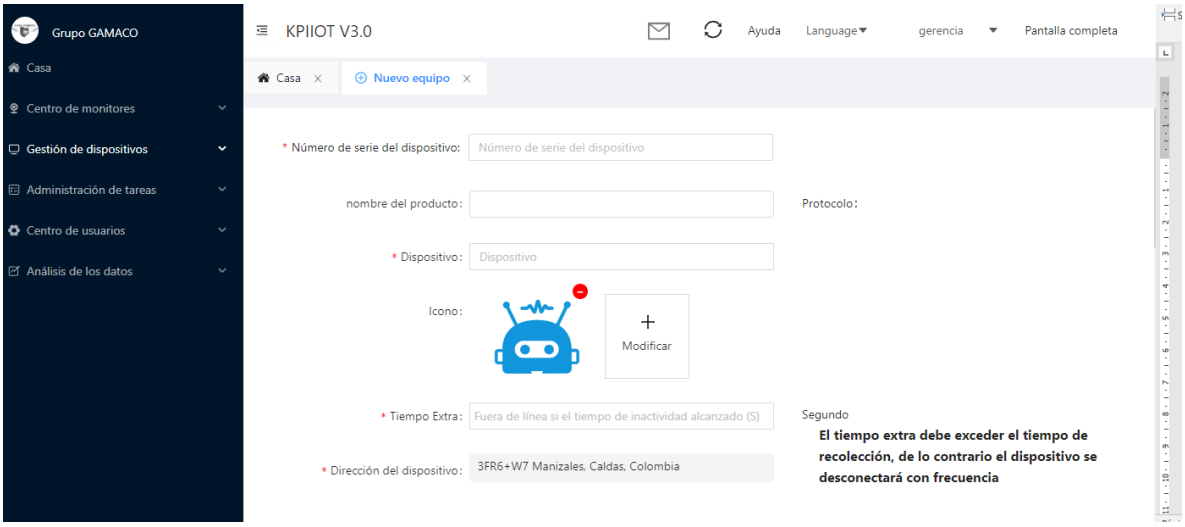
Nota: previamente se deberá tener usuario y contraseña para el ingreso, como el equipo fue vendido por el grupo GAMACO, para la presente guía de usuario se ingresará desde un usuario y contraseña de esta empresa.

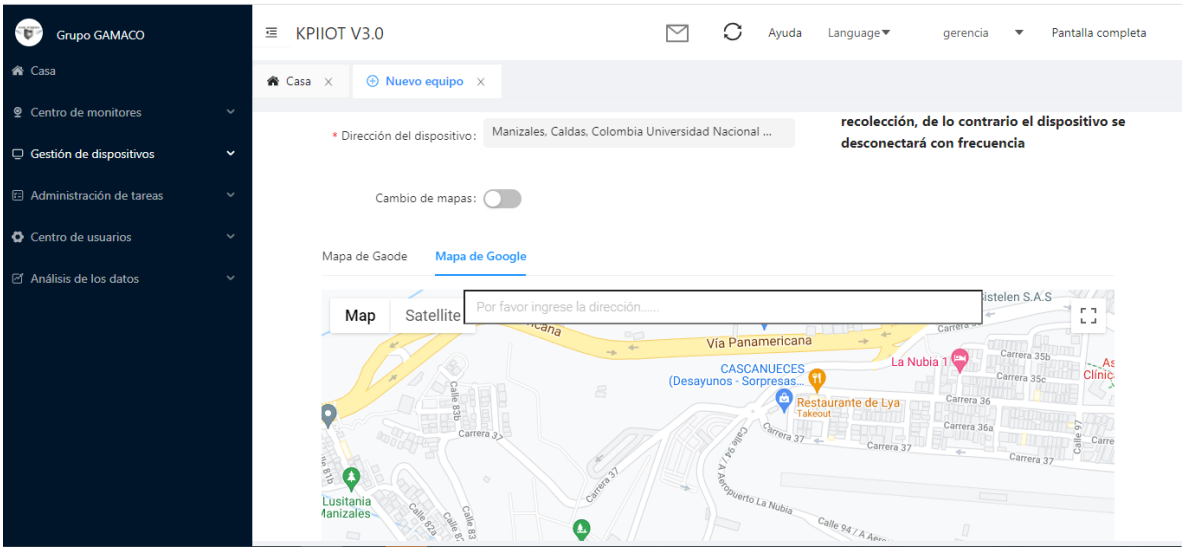


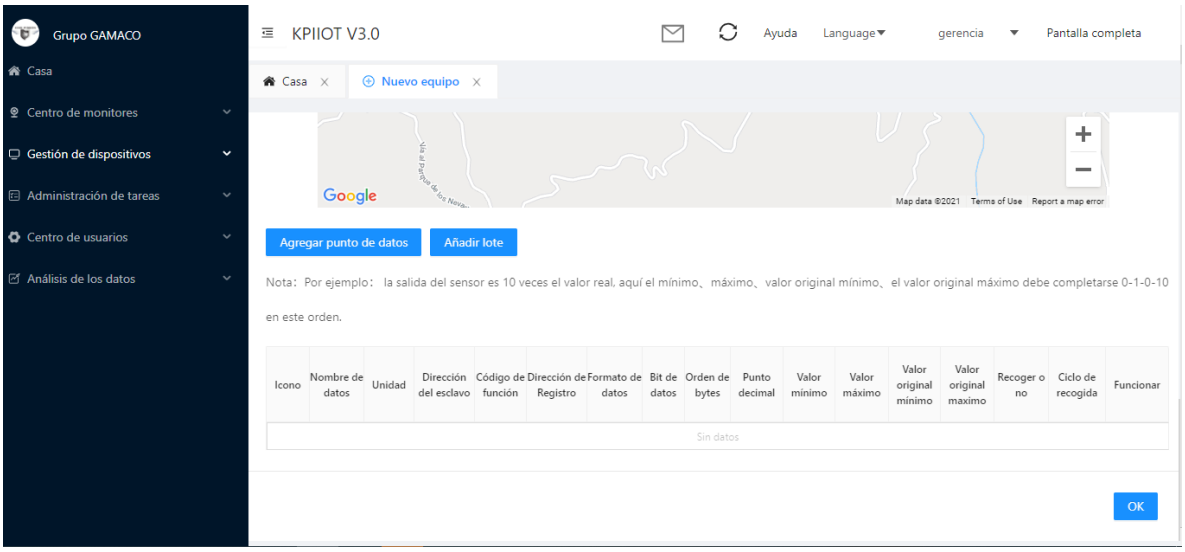
Al ingresar el usuario y contraseña proporcionados por el grupo GAMACO deberá aparecer la siguiente visualización:



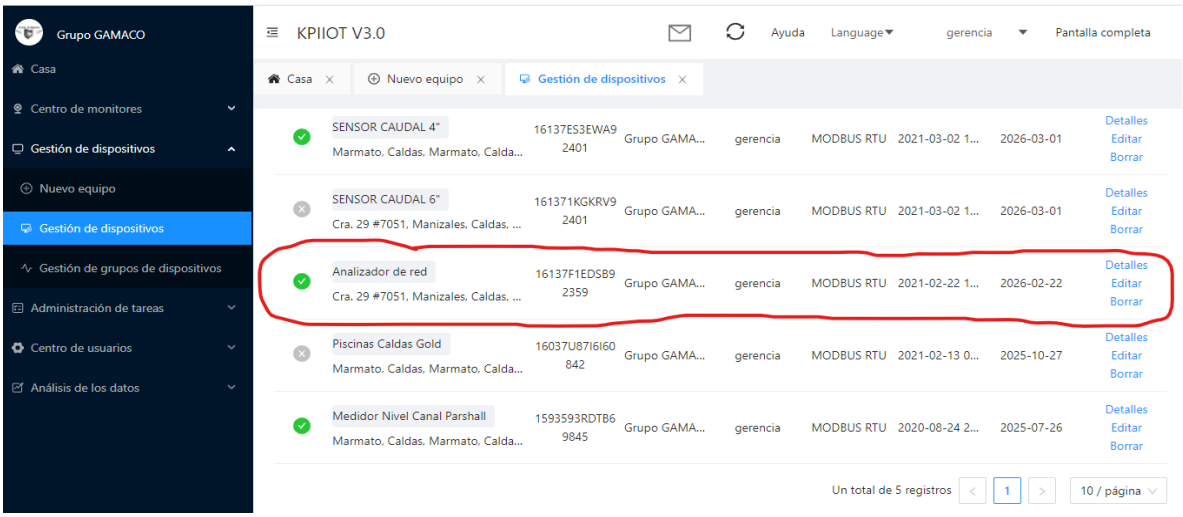
En la parte izquierda están todas las opciones que ofrece la plataforma, para añadir el dispositivo si aún no se tiene en la plataforma, se deberá dar clic en Gestión del dispositivo / Nuevo Dispositivo, luego se ingresaran los siguientes datos:


Grupo GAMACO
Casa
Centro de monitores
Gestión de dispositivos
Administración de tareas
Centro de usuarios
Análisis de los datos
KPIIOT V3.0
Ayuda
Language
gerencia
Pantalla completa
Casa
Nuevo equipo
* Número de serie del dispositivo:
Número de serie del dispositivo
nombre del producto:
Protocolo:
* Dispositivo:
Dispositivo
Icono:
Modificar
* Tiempo Extra:
Fuera de línea si el tiempo de inactividad alcanzado (S)
Segundo
* Dirección del dispositivo:
3FR6+W7 Manizales, Caldas, Colombia
El tiempo extra debe exceder el tiempo de recolección, de lo contrario el dispositivo se desconectará con frecuencia


Grupo GAMACO
Casa
Centro de monitores
Gestión de dispositivos
Administración de tareas
Centro de usuarios
Análisis de los datos
KPIIOT V3.0
Ayuda
Language
gerencia
Pantalla completa
Casa
Nuevo equipo
* Dirección del dispositivo:
Manizales, Caldas, Colombia Universidad Nacional ...
recolección, de lo contrario el dispositivo se desconectará con frecuencia
Cambio de mapas:
Mapa de Gaode
Mapa de Google
Map
Satellite
Por favor ingrese la dirección.....
Vía Panamericana
CASCANUECES
(Desayunos - Sorpresas...
Restaurante de Lya
Takeout
La Nubia
Carrera 35b
Carrera 35c
Carrera 36
Carrera 36a
Carrera 37
Calle 94 / A Aeropuerto La Nubia
Lusitania
Manizales


Grupo GAMACO
Casa
Centro de monitores
Gestión de dispositivos
Administración de tareas
Centro de usuarios
Análisis de los datos
KPIIOT V3.0
Ayuda
Language
gerencia
Pantalla completa
Casa
Nuevo equipo
Google
Map data ©2021
Terms of Use
Report a map error
Agregar punto de datos
Añadir lote
Nota: Por ejemplo: la salida del sensor es 10 veces el valor real, aquí el mínimo、máximo、valor original mínimo、el valor original máximo debe completarse 0-1-0-10 en este orden.
Icono
Nombre de datos
Unidad
Dirección del esclavo
Código de función
Dirección de Registro
Formato de datos
Bit de datos
Orden de bytes
Punto decimal
Valor mínimo
Valor máximo
Valor original mínimo
Valor original maximo
Recoger o no
Ciclo de recogida
Funcionar
Sin datos
OK

Una vez agregado el dispositivo, para gestionar el dispositivo se deberá dar clic en “gestión del dispositivo” y se deberá comprobar que el Gateway aparezca como conectado, para ello este debe estar previamente encendido, así:



Luego se le dará en editar al dispositivo seleccionado, donde aparecerá lo siguientes datos que anteriormente fueron pre cargados:

Agregar punto de datos | Añadir lote

Nota: Por ejemplo: la salida del sensor es 10 veces el valor real, aquí el mínimo、máximo、valor original mínimo、el valor original máximo debe completarse 0-1-0-10 en este orden.

Icono	Nombre de datos	Unidad	Dirección del esclavo	Código de función	Dirección de Registro	Formato de datos	Bit de datos	Orden de bytes	Punto decimal	Valor mínimo	Valor máximo	Valor original mínimo	Valor original maximo	Recoger o no	Ciclo de recogida	Funcionar
	Hum	%	1	Registro de solo lectura (04)	25	Entero con signo de 16 bits		AB	2	0	1	0	100	Si	60	Borrar
	Tensi		1	Registros R&W (03/06)	20000	Entero sin signo de 16 bits		AB	0	0	0	0	0	Si	30	Borrar
	Temp		1	Registro de solo lectura (04)	24	Entero sin signo de 16 bits		AB	2	1	0	100	0	Si	30	Borrar

Un total de 3 registros < 1 >

Cancelar | OK

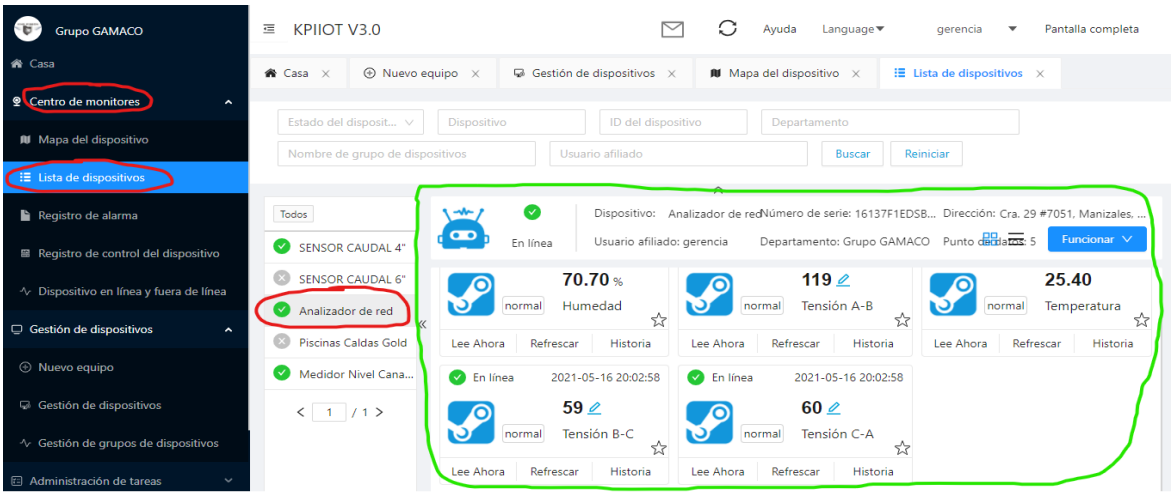
Anteriormente se cargaron en la plataforma los registro de Humedad, Temperatura y Tension A-B (en la direccion 20000 anteriormente vista) para cargar otros registros como por ejemplo la tension B-C y tension C-A se debera dar clic en el boton “punto de datos” donde saldra otra fila donde podemos agregar la direccion del registro que se dea leer y demas informacion que pide la tabla (mirar columnas de la tabla), agregando estos registros la tabla quedara de la siguiente manera:

Modelo del Producto S373

Punto de datos

Icono	Punto de datos	Unidad	Dirección del esclavo	Código de función	Dirección de registro	Formato de datos	Bit de datos	Orden de bytes	Dígitos decimales	Valor mínimo	Valor máximo	Valor original mínimo	Valor original maximo	Recoger o no	Ciclo d recogid
	Humedad	%	1	Registro de solo lectura (04)	25	Entero con signo de 16 bits		AB	2	0	1	0	100	Si	60
	Tensión A-B		1	Registros R&W (03/06)	20000	Entero sin signo de 16 bits		AB	0	0	0	0	0	Si	30
	Temperat ura		1	Registro de solo lectura (04)	24	Entero sin signo de 16 bits		AB	2	1	0	100	0	Si	30
	Tensión B-C		1	Registros R&W (03/06)	20001	Entero sin signo de 16 bits		AB	0	0	0	0	0	Si	30
	Tensión C-A		1	Registros R&W (03/06)	20002	Entero sin signo de 16 bits		AB	0	0	0	0	0	Si	30

Una vez agregados los registros que se desean visualizar del Gateway, en la plataforma se debe ingresar a Centro de monitores / Lista de Dispositivos, Allí se buscara el dispositivo y se verá toda la información que se haya programado, así:



Como se puede observar, desde la nube se pueden visualizar los mismos datos que se obtuvieron desde el programador del Gateway y desde los equipos.

Nota: Desde las plataformas de la nube y el programador del Gateway se pueden realizar muchas más funciones y programación de alarmas o alertas, el presente instructivo solo es una introducción muy sencilla al manejo, configuraciones y soluciones que se pueden realizar por medio de un dispositivo de adquisición de datos como el Gateway S373.

6. Bibliografía

[1] International Energy Agency - IEA, “Electricity consumption, world 1990-2017. Data & Statistics.” Web page. https://www.iea.org/policies/about.

[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.” .

[6] International Energy Agency - IEA, “IEA webstore. GlobalABC Roadmap for Buildings and Construction 2020-2050,” Jul. 2020. .

[7] M. Guerrieri, M. La Gennusa, G. Peri, G. Rizzo, and G. Scaccianoce, “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] IEA (International Energy Agency), “GlobalABC, IEA and UNEP 2020 (2020), GlobalABC Regional Roadmap for Buildings and Construction in Latin America 2020-2050, IEA, Paris .”

[9] 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.jobe.2019.100772.

[10] Internatinal Energy Agency - IEA, “Climate change.” Web page. https://www.iea.org/policies/about.

[11] UPME, “Plan De Acción Indicativo De Eficiencia Energética 2017 - 2022,” p. 157, 2017.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 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.

[15] S. Attia, “Roadmap for NZEB Implementation,” *Net Zero Energy Build.*, pp. 343–369, 2018, doi: 10.1016/b978-0-12-812461-1.00012-5.

[16] 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.

[17] 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.

[18] J. Zuo, B. Read, S. Pullen, and Q. Shi, “Achieving carbon neutrality in commercial building developments - Perceptions of the construction industry,” *Habitat Int.*, vol. 36, no. 2, pp. 278–286, Apr. 2012, doi: 10.1016/j.habitatint.2011.10.010.

[19] 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.

[20] 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.

[21] H. Mirinejad, K. C. Welch, and L. Spicer, “A review of intelligent control techniques in HVAC systems,” 2012, doi: 10.1109/EnergyTech.2012.6304679.

[22] K. McGlinn, 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.

[23] 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.

[24] J. L. Chen, H. Bin Liu, W. Wu, and D. T. Xie, “Estimation of monthly solar radiation from measured temperatures using support vector machines - A case study,” *Renew. Energy*, vol. 36, no. 1, pp. 413–420, 2011, doi: 10.1016/j.renene.2010.06.024.

[25] W. Feng *et al.*, “A review of net zero energy buildings in hot and humid climates: Experience learned from 34 case study buildings,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 114, no. June, p. 109303, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.109303.

[26] 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.

[27] Hermelink, A., Schimschar, S., Boermans, T., Pagliano, L., Zangheri, P., Armani, R., Voss, K., & Musall, E., “Towards nearly zero-energy buildings. Definition of common principles under the EPBD. Final report (Miscellaneous) | ETDEWEB,” *Feb 15, 2013*, Feb. 2013. .

[28] J. Zhang, N. Zhou, A. Hinge, W. Feng, and S. Zhang, “Governance strategies to achieve zero-energy buildings in China,” *Build. Res. Inf.*, vol. 44, no. 5–6, pp. 604–618, Aug. 2016, doi: 10.1080/09613218.2016.1157345.

[29] I. B. E. E. (2018) . International Partnership for Energy Efficiency Cooperation: Paris, France.Taskgroup, “Zero Energy Building Definitions and Policy Activity-An International Review.”

[30] K. B. Dokka, T. H., Sartori, I., Thyholt, M., Lien, K., & Lindberg, “A Norwegian zero emission building definition. Passivhus Norden, 15-17.”

[31] “Zero Carbon Hub: Zero Carbon Policy, 2021.” .

[32] APEC Energy Working Group., “APEC Project report: Nearly (Net) zero energy building. Beijing, China: APEC.”

[33] Natural Resources Canada, “Details of the R-2000 Standard ,” 2012. Weg page. https://www.nrcan.gc.ca/energy-efficiency/homes/buying-energy-efficient-new-home/r-2000-environmentally-friendly-homes/20575.

[34] P. P. S. D. M. and C. D. Torcellini, “Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition; Preprint (Conference) | OSTI.GOV,” Jun. 2006. Article.

[35] J. Laustsen, “Energy Efficiency Requirements in Building Codes, Energy Efficiency Policies for New Buildings. IEA Information Paper (Book) | ETDEWEB,” Mar. 2008.

[36] Dr. Sam C. M. Hui, “Zero energy and zero carbon buildings: myths and facts,” September, pp. 1–13, 2010.

[37] 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.

[38] 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.

[39] 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.

[40] L. Wells, B. Rismanchi, and L. Aye, “A review of Net Zero Energy Buildings with reflections on the Australian context,” *Energy Build.*, vol. 158, pp. 616–628, 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.10.055.

[41] 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.

[42] M. P. E. De Angelis, A.L.C. Ciribini, L.C. Tagliabue, “The Brescia smart campus demonstrator. Renovation toward a zero energy classroom building.”

[43] 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.

[44] European Commission: “Energy performance of buildings directive | Energy.” https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en. 2021.

[45] ZEBRA 2020, “Zebra2020 - Estrategia de construcción de energía casi cero 2020.” Pagina Web. https://zebra2020.eu/.

[46] I. Juraga, M. Paviotti, and B. Berger, “The Environmental Noise Directive at a turning point.” Article.

[47] G. B.-F. Register 2007, “Strengthening federal environmental, energy, and transportation management.” federal regulation.

[48] Víctor Severino Mendoza Velázquez, “La política energética de los Estados Unidos de América durante el,” Feb. 2018.

[49] “R2000 Standard,” Canda, 2012. Regulation.

[50] 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.

[51] 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.

[52] “Ministry of Housing and Urban-Rural Development (MOHURD), PRC | Regional Knowledge Sharing Initiative.” Regulation.

[53] H. Li, S. Zhang, M. Okumiya, K. Y.-B. Sci, and undefined 2017, “Japan zero energy building development status.”

[54] IEA “Act on the Rational Use of Energy, Japan.” .

[55] 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.

[56] 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.

[57] A. K. Athienitis, G. Barone, A. Buonomano, and A. Palombo, “Assessing active and passive effects of façade building integrated photovoltaics/thermal systems: Dynamic modelling and simulation,” *Appl. Energy*, vol. 209, no. November 2017, pp. 355–382, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.09.039.

[58] 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.

[59] 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.

[60] 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.

[61] 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.

[62] 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.

[63] 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.

[64] 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.

[65] 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.

[66] E. F. Zalamea-León and R. H. García-Alvarado, “Integración de captación activa y pasiva en viviendas unifamiliares de emprendimientos inmobiliarios,” *Ambient. Construído*, vol. 18, no. 1, pp. 445–461, 2017, doi: 10.1590/s1678-86212018000100231.

[67] 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.

[68] W. E. Council, “World Energy Trilemma Priority actions on climate change and how to balance the trilemma,” *WEC*, p. 53, 2015.

[69] International Energy Agency, “Energy, Climate Change and Enviroment 2016 Insights,” p. 133, 2016, doi: 10.1787/9789264266834-en.

[70] B. Dean, “Towards zero-emission efficient and resilient buildings.: Global Status Report,” 2016.

[71] S. Attia, *NZEB Case Studies and Learned Lessons*, Book. 2018.

[72] 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.

[73] T. F. Slaper, “The Triple Bottom Line: What Is It and How Does It Work? The Triple Bottom Line Defined.”

[74] 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.

[75] “Household Energy Consumption Survey, User Guide, Australia, 2012.” .

[76] M. Baechler, J. Williamson, T. Gilbride, P. Cole, M. Hefty,. 2010, “Guide to determining climate regions by county.”

[77] 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.

[78] 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.

[79] 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.

[80] 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.

[81] C. y. T. Ministerio de Vivienda, “Resolución numero 0549 de 2015,” 2015. https://www.cccs.org.co/wp/download/resolucion-0549-de-2015/.

[82] 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.

[83] 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.

[84] 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.

[85] 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.

[86] O. Majeed, M. Zulqarnain, and T. Majeed, "Recent advancement in smart grid technology : Future prospects in the electrical power network," *Ain Shams Eng. J*, 2020, doi: 10.1016/j.asej.2020.05.004.

[87] 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.

[88] S. Attia, *Net Zero Energy Buildings Performance Indicators and Thresholds*. 2018.

[89] S. Attia and S. Carlucci, "Impact of different thermal comfort models on zero energy residential buildings in hot climate," *Energy Build.*, vol. 102, pp. 117–128, Jun. 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.05.017.

[90] J. M. Taylor, "Sustainable Building Practices: Legislative and Economic Incentives," *Manag. Innov. a Sustain. Built Environ. MISBE 2011* , no. June, 2011.

[91] "Motivation and Expectation of Developers on Green Construction: A Conceptual View." .

[92] 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. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.01.028.

[93] 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.

[94] Dahiana López García, "Caracterización de un esquema remunerativo para la participación de la demanda en la prestación del servicio complementario de control de frecuencia en el mercado eléctrico colombiano," Universidad Nacional de Colombia, 2019.

[95] “Biophilic Design: The Theory, Science and Practice of Bringing Buildings to Life - Stephen R. Kellert, Judith Heerwagen, Martin Mador - Google Libros.” .

[96] 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.

[97] Q. Jin and M. Overend, “Facade renovation for a public building based on a whole-life value approach,” 2012.

[98] 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. 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.06.007.

[99] 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.

[100] 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.

[101] 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.

[102] 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.

[103] 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.

[104] 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.

[105] 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.

[106] P. Odonkor and K. Lewis, “Adaptive Operation Decisions in Net Zero Building Clusters,” Aug. 2015, doi: 10.1115/detc2015-47290.

[107] 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.compenvurbsys.2016.09.007.

[108] Clinton Fundation: "Clinton Climate Initiative - C40.” https://www.clintonfoundation.org/programs/climate-change-disaster-recovery/clinton-climate-initiative/.

[109] “International Energy Agency’s Energy in Buildings and Communities Programme.” .

[110] 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.

[111] A. Zhivov *et al.*, “Net Zero Building Cluster Energy Systems Analysis for U.S. Army Installations.”

[112] 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.

[113] M. Mehrtash, 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.

[114] 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.

[115] Ş. Kılkış, 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.

[116] 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, Jul. 2016, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2016.04.038.

[117] 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.

[118] 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.

[119] M. Krarti, *Integrated Design and Retrofit of Buildings*. 2018.

[120] 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.

[121] “Sustainable Renovation: Strategies for Commercial Building Systems and Envelope - Lisa Gelfand, Chris Duncan - Google Libros.” .

[122] 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.

[123] 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.

[124] C. Outline, *Energy Efficiency in Building Renovation*. 2019.

[125] IEA - International Energy Agency, *Experience Curves for Energy Technology Policy*. Paris, France: IEA Publications, 2000.

[126] IEEE, *IEEE 1547.4 Guide for Design , Operation , and Integration of Distributed Resource Island Systems with Electric Power Systems IEEE Standards Coordinating Committee 21 Sponsored by the*, no. July. 2011.

[127] ICONTEC, *NTC - ISO 5001*. 2011. https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:50001:ed-1:v1:es.

[128] R. Del Pilar Castrillon and A. M. Quintero, “The energy planning according to the ISO 50001 contribute to the consolidation of a Sustainable Campus to the Universidad Autonoma de Occidente,” *IEEE ICA-ACCA 2018 - IEEE Int. Conf. Autom. Congr. Chil. Assoc. Autom. Control Towar. an Ind. 4.0 - Proc.*, pp. 1–7, 2019, doi: 10.1109/ICA-ACCA.2018.8609765.

[129] EL CONGRESO DE COLOMBIA, “Ley 1715 de 2014,” no. May. p. 26, 2014.

[130] Enersinc - Departamento Nacional de Planeación, “Energy Demand Situation in Colombia,” p. 136, 2017.

[131] COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS, “RESOLUCIÓN No. 030 DE 2018,” 2018. .

[132] COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS, “Resolución No. 038 de 2018,” 2018.

[133] Ministerio de Minas y Energía, “Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctrica - RETIE.” .

[134] Ministerio de Minas y Energía, “Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público – RETILAP.” .

[135] “Consejo Colombiano de Construcción Sostenible – CCCS – Liderando el desarrollo sostenible de la industria de la construcción.” .

[136] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, “Edificaciones Sostenibles.” .

[137] CONGRESO DE COLOMBIA, “Ley 1955 de 2019.” https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=93970 .

[138] V. Y. D. T. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA Y MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, “Reglamento Técnico de Eficiencia Energética para Viviendas de Interés Social RETEVIS.” .

[139] Ministerio de Vivienda “Plan de acción sectorial de mitigación para el sector vivienda y desarrollo territorial estrategia colombiana de desarrollo bajo en carbono.” 2014.

[140] ciudad y territorio. Ministerio de minas, “Anexo Técnico Inicial,” no. 1, 2013.

[141] J. Manuel *et al.*, “Documento CONPES.”

[142] “Edificio Ean Legacy | Universidad Ean.” 2021.

[143] “Energy considerations of social dwellings in Colombia according to the NZEB concept.pdf.”

[144] J. A. Marquez Ceballos, “Criterios para la Planeación de Sistemas de Gestión de Energía en un Campus Universitario,” 2019.

[145] Universidad Nacional de Colombia, “Universidad Nacional de Colombia: Plazoleta: bloques P, Q y R.” .

[146] UNIMEDIOS: Universidad Nacional de Colombia, “UNAL Sede Manizales crece en infraestructura de última tecnología ,” Nov. 2019. .

[147] UNIMEDIOS: Universidad Nacional de Colombia, “Bloque L,” *2016*, 2016.

[148] xk - exkema, “Bloque W Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales,” Feb. 2018. .

[149] UNIMEDIOS: Universidad Nacional de Colombia, “Bloque W Sede Manizales,” *2017*. .

[150] LA PATRIA, “Abren los bloques S1 y S2 de la Universidad Nacional sede Manizales,” *2019*, Nov. 2019.

[151] Academia colombiana de Arquitecruta y Diseño, “Planteamiento de estrategias bioclimáticas - Universidad nacional de Colombia Campus la Nubia sede Manizales BLoque S,” no. 57, 2015.

[152] J. A. Márquez Ceballos, J. D. Marín Jiménez, and S. X. Carvajal-Quintero, “Análisis del Impacto de la Implementación de Sistemas de Gestión de Energía en los Campus Universitarios en Colombia,” *XVI Encuentro Colomb. Dinámica Sist.*, 2018.

[153] J. A. Márquez Ceballos, J. D. Marín Jiménez, and S. X. Carvajal-Quintero, “Sistema de gestión energética en el campus la Nubia de la Universidad Nacional de Colombia: fase 1_ Diagnóstico,” *CIUREE*, 2018.

[154] “NORMA TÉCNICA NTC-ISO COLOMBIANA 50001,” 2011.

[155] I. Dzene, I. Polikarpova, L. Zogla, and M. Rosa, “Application of ISO 50001 for Implementation of Sustainable Energy Action Plans,” *Energy Procedia*, vol. 72, pp. 111–118, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.06.016.

[156] IDEAM, “Atlas Interactivo - Radiación.” .

[157] KING PIGEON, “Soluciones IOT, Soluciones IoT industriales, Gateway IoT industrial, Gateway IoT.”

[158] D. Reynders, S. Mackay, E. Wright, and S. Mackay, “RS-485 overview,” in *Practical Industrial Data Communications*, Elsevier, 2004, pp. 92–96.

[159] KING PIGEON, “Puerta de enlace 4G Lora S281.”

[160] D. Valencia López, “Programas de Gestión de Demanda Energética en el Sector Industrial. Aplicación de la Analítica para su Diseño e Implementación,” 2016.

[161] J. D. Marín Jiménez, “Análisis para la provisión del Servicio Complementario de Capacidad

de Operación por Islas a partir de Recursos Energéticos Distribuidos en ambientes desregulados," pp. 1–424, 2017.

[162] M. F. Zia, M. Benbouzid, E. Elbouchikhi, S. M. Muyeen, K. Techato, and J. M. Guerrero, "Microgrid transactive energy: Review, architectures, distributed ledger technologies, and market analysis," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 19410–19432, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2968402.

[163] H. Ben Abdeljawed and L. El Amraoui, "Prospects for synergies between low-voltage DC microgrid technology and peer-to-peer energy trading markets," *Sustain. Prod. Consum.*, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.SPC.2021.07.029.

[164] L. Ableitner, V. Tiefenbeck, A. Meeuw, A. Wörner, E. Fleisch, and F. Wortmann, "User behavior in a real-world peer-to-peer electricity market," *Appl. Energy*, vol. 270, p. 115061, Jul. 2020, doi: 10.1016/J.APENERGY.2020.115061.

[165] Y. Wu, Y. Wu, J. M. Guerrero, and J. C. Vasquez, "Digitalization and decentralization driving transactive energy Internet: Key technologies and infrastructures," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 126, Mar. 2021, doi: 10.1016/J.IJEPES.2020.106593.

[166] Y. Liu, L. Wu, and J. Li, "Peer-to-peer (P2P) electricity trading in distribution systems of the future," *Electr. J.*, vol. 32, no. 4, pp. 2–6, May 2019, doi: 10.1016/J.TEJ.2019.03.002.

[167] J. Lin, M. Pipattanasomporn, and S. Rahman, "Comparative analysis of auction mechanisms and bidding strategies for P2P solar transactive energy markets," *Appl. Energy*, vol. 255, p. 113687, Dec. 2019, doi: 10.1016/J.APENERGY.2019.113687.

[168] NATURAL PRESS, "Mercados de energía peer-to-peer ¿Qué es eso? - Natural Press."