

ESTIMACIÓN DE IMPACTOS DEBIDO A LA INTEGRACIÓN DE APLICACIONES URE Y  
PROGRAMA DE RESPUESTA DE LA DEMANDA EN UNA EDIFICACIÓN  
UNIVERSITARIA A PARTIR DE SIMULACIONES 1

Estimación de impactos debido a la integración de aplicaciones URE y programa de respuesta de  
la demanda en una edificación universitaria a partir de simulaciones

Marlon Millán Martínez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Magíster en Ingeniería Eléctrica

Director

German Alfonso Osma Pinto

Doctorado en Ingeniería

Codirector

Julián Ernesto Jaramillo Ibarra

Doctorado en Ingeniería

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Maestría en Ingeniería Eléctrica

Bucaramanga

2024

### **Agradecimientos**

Al Grupo de Investigación de Sistemas Eléctricos (GISEL) por haber brindado el apoyo a esta candidatura a maestría.

A mi director de tesis, German Alfonso Osma Pinto, por confiar en mis capacidades, poner a disposición todo su conocimiento y experiencia en mi proceso formativo.

## Tabla de Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	12
1. Objetivos.....	19
1.1 Objetivo General.....	19
1.2 Objetivos Específicos.....	19
2. Integración de estrategias de eficiencia energética en edificaciones .....	21
2.1 Edificaciones verdes y construcción sostenible.....	21
2.1.1 Contexto colombiano sobre construcción sostenible.....	23
2.1.2 Aplicaciones de uso racional y eficiente de energía (URE) .....	25
2.1.2.1 Estrategias pasivas .....	25
2.1.2.1 Estrategias activas.....	26
2.2 Gestión de la demanda.....	27
2.2.1 Respuesta del lado de la demanda (RD) .....	29
2.2.1 Marco regulatorio colombiano para la RD .....	31
3. Modelado energético de edificaciones.....	34
3.1 Descripción constructiva del caso de estudio (EIE) .....	34
3.2 Elaboración del modelo energético del EIE.....	37
3.2.1 Modelado 3D de la edificación .....	37
3.2.2 Caracterización de los componentes del EIE.....	40
3.3 Elaboración del modelo de línea base del EIE.....	41
4. Simulación energética del Edificio de Ingeniería Eléctrica (UIS).....	44
4.1 Configuración de parámetros de simulación en DesignBuilder V6.....	44

4.2 Descripción de los escenarios de simulación.....	45
4.3 Análisis de resultados de los escenarios de simulación .....	47
5. Construcción del indicador compuesto de Desempeño Energético de Edificaciones (DEE)...	52
5.1 Proceso de construcción de indicadores compuestos.....	52
5.1.1 Métodos de normalización de datos.....	54
5.1.2 Ponderación de subindicadores .....	55
5.1.3 Estrategias de agregación de indicadores .....	56
5.2 Formulación del indicador de Desempeño Energético de Edificaciones (DEE) .....	57
6. Aplicación del indicador compuesto DEE en el EIE .....	62
6.1 Resultados del indicador DEE y estimación de impactos de las EEE en el EIE .....	62
6.2 Verificación de idoneidad del indicador DEE .....	64
7. Conclusiones .....	69
8. Recomendaciones y trabajo futuro.....	72
Referencias Bibliográficas .....	73
Apéndices.....	89

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 <i>Listado de códigos, estándares y certificaciones para CS.</i> .....	23
Tabla 2 <i>Marco regulatorio para el desarrollo de la CS en Colombia.</i> .....	24
Tabla 3 <i>Marco regulatorio colombiano para la RD.</i> .....	31
Tabla 4 <i>Resumen de las características y componentes del EIE.</i> .....	36
Tabla 5 <i>Características de elementos constructivos para el modelo energético del EIE.</i> .....	41
Tabla 6 <i>Características de elementos constructivos para el modelo energético de línea base del EIE.</i> .....	43
Tabla 7 <i>Listado de escenarios de simulación propuestos.</i> .....	46
Tabla 8 <i>Resultados de métricas para los escenarios de simulación propuesto.</i> .....	48
Tabla 9 <i>Métodos de normalización de datos más empleados en la literatura.</i> .....	54
Tabla 10 <i>Clasificación de métodos de ponderación para indicadores (Becker et al., 2017; El Gibari et al., 2019, 2021; Kaldas et al., 2021; Maricic et al., 2019; Medlol &amp; Alwash, 2020).</i> ..	55
Tabla 11 <i>Selección de subindicadores y métricas del indicador compuesto DEE.</i> .....	59
Tabla 12 <i>Escenarios para el análisis de sensibilidad del indicador compuesto DEE.</i> .....	61
Tabla 13 <i>Resultados de los subindicadores aplicando el método de normalización de datos DVR.</i> .....	62
Tabla 14 <i>Resultados de los subindicadores aplicando el método de normalización de datos Z-score.</i> .....	64

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1 <i>Esquema del desarrollo de los objetivos específicos del trabajo de investigación.</i> .....	20
Figura 2 <i>Componentes de un sistema de DSM. Adaptado de (DNP &amp; Enersinc, 2017).</i> .....	27
Figura 3 <i>Esquema de DSM implementando BEMS. Adaptado de (Rotger-Griful et al., 2017).</i> .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 4 <i>Beneficios de los programas de Respuesta de la Demanda (RD) en EE.UU. Fuente: Base de datos U.S. Energy Information Administration (EIA).</i> .....	30
Figura 5 <i>Clasificación programas de Respuesta de la Demanda (RD). Adaptado de (Aalami et al., 2019)</i> .....	30
Figura 6 <i>Esquema de aplicación del programa de RD establecido en la Resolución CREG 011 de 2015.</i> .....	33
Figura 7 <i>Vista de la fachada sur del EIE.</i> .....	36
Figura 8 <i>Asignación de ubicación del modelo y las variables meteorológicas de la envolvente.</i>	38
Figura 9 <i>Modelo 3D del EIE para condiciones actuales elaborado en DesignBuilder.</i> .....	39
Figura 10 <i>Modelo 3D del EIE para condiciones actuales elaborado en DesignBuilder.</i> .....	42
Figura 11 <i>Modelo energético de línea base del EIE.</i> .....	42
Figura 12 <i>Consumo energético anual desagregado por componente para los modelos de condiciones actuales (ES1) y línea base (ES2) del EIE.</i> .....	47
Figura 13 <i>Tiempo total de activación del programa de RD durante el año 2015.</i> .....	50
Figura 14 <i>Energía generada por el sistema FV y consumo energético por escenario de simulación durante la activación del programa de RD.</i> .....	51
Figura 15 <i>Consumo energético no suministrado durante la activación del programa de RD.</i> ....	51

Figura 16 <i>Metodología para la construcción de indicadores compuestos según la OECD.</i> .....	53
Figura 17 <i>Metodología de trabajo para la construcción del indicador compuesto DEE.</i> .....	57
Figura 18 <i>Resultados de la aplicación del indicador compuesto DEE en el EIE.</i> .....	63
Figura 19 <i>Resultados del indicador compuesto DEE evaluados con los métodos de normalización DRV y agregación lineal ponderada.</i> .....	65
Figura 20 <i>Resultados del indicador compuesto DEE evaluados con los métodos de normalización DRV y agregación geométrica.</i> .....	65
Figura 21 <i>Resultados del indicador compuesto DEE evaluados con los métodos de normalización Z-score y agregación lineal ponderada.</i> .....	66
Figura 22 <i>Resultados del indicador compuesto DEE evaluados con los métodos de normalización Z-score y agregación lineal ponderada.</i> .....	67

**Lista de Apéndices**

**pág.**

Apéndice A. Descripción de los componentes constructivos y operativos del EIE ..... 89

## Glosario

**Indicador compuesto:** Herramienta cuantitativa que combina diferentes indicadores individuales o subindicadores en un único indicador, los cuales están asociados a fenómenos complejos y multidimensionales (Gatto & Drago, 2020; OECD et al., 2008).

**Confort térmico:** Condición mental deseable o positiva que experimenta una persona en relación con la sensación que percibe (Chow, 2022).

**Eficiencia energética:** Relación entre la energía aprovechada y energía la total utilizada en cualquier proceso de la cadena energética, dentro del marco del desarrollo sostenible y respetando la normatividad vigente sobre medio ambiente y, los recursos naturales renovables.

**Respuesta del lado de la demanda (RD):** Acciones encaminadas a modificar los hábitos de consumo de energía eléctrica por parte del usuario final, en relación a señales de precio o incentivos económicos establecidos en la reglamentación de cada país (U.S. Department of Energy, 2024).

**Uso racional y eficiente de energía (URE):** Es el aprovechamiento óptimo de la energía en toda la cadena energética, desde la selección de la fuente energética, producción, transformación, transporte, distribución, y consumo incluyendo su reutilización cuando sea posible, buscando en cada una de las actividades el desarrollo sostenible.

**Construcción sostenible:** Práctica de crear estructuras y utilizar procesos que sean ambientalmente responsables y eficientes en el uso de recursos durante todo el ciclo de vida de un edificio, desde el emplazamiento hasta el diseño, construcción, operación, mantenimiento, renovación y la demolición (U.S. Environmental Protection Agency, 2024).

## Resumen

**Título:** Estimación de impactos debido a la integración de aplicaciones URE y programa de respuesta de la demanda en una edificación universitaria a partir de simulaciones\*

**Autor:** Marlon Millán Martínez\*\*

**Palabras Clave:** Desempeño Energético, Indicadores Compuestos, Estrategias de Eficiencia Energética, Respuesta del lado de la Demanda, Consumo Energético en Edificaciones.

**Descripción:** Este trabajo de investigación presenta la construcción del indicador compuesto de Desempeño Energético de Edificaciones (*DEE*), como una herramienta para analizar la incidencia de la integración de estrategias de eficiencia energética (EEE) (*e.g.* aplicaciones URE y programa RD), en una edificación universitaria. Inicialmente, se realizó la caracterización de los diferentes componentes del Edificio de Ingeniería Eléctrica (EIE) de la Universidad Industrial de Santander (UIS) (caso de estudio) y se elaboró el modelo virtual de este en el software DesignBuilder V6. Posterior a esto, se plantearon diferentes escenarios de simulación que contemplan las EEE del EIE de manera individual y conjunta. Asimismo, se aborda una revisión conceptual de las fases para la construcción de indicadores compuesto (*e.g.*, selección, agregación y ponderación de sub-indicadores) y se estableció el indicador DEE como la agregación matemática de los sub-indicadores de eficiencia energética (EE), confort térmico (CO), redundancia (RE) y adaptabilidad (AD). Finalmente, se realizó un análisis de sensibilidad con diferentes métodos matemáticos de agregación y ponderación de los sub-indicadores que permitió verificar la idoneidad del indicador compuesto para reproducir el comportamiento del edificio, evidenciando que las EEE mejoran el desempeño energético del EIE en aproximadamente un 48%.

---

\* Trabajo de Investigación

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Maestría en Ingeniería Eléctrica. Director: German Alfonso Osma Pinto. Doctor en Ingeniería. Codirector: Julián Ernesto Jaramillo Ibarra. Doctor en Ingeniería

### Abstract

**Title:** Estimation of impacts due to the integration of URE applications and demand response program in a university building based on simulations\*

**Author(s):** Marlon Millán Martínez<sup>5</sup>

**Key Words:** Energy Performance, Composite Indicators, Energy Efficiency Strategies, Demand Response, Buildings Energy Consumption.

**Description:** This research work presents the construction of the composite indicator of Buildings Energy Performance (BEP), as a tool to analyze the incidence of the integration of energy efficiency strategies (EES) (*e.g.* URE applications and DR program), in a university building. Initially, the characterization of the different components of the Electrical Engineering Building (EEB) of the Industrial University of Santander (UIS) (case study) was carried out and the virtual model of this was created in the DesignBuilder V6 software. After this, different simulation scenarios were proposed that consider the EEB's EES individually and jointly. Likewise, a conceptual review of the phases for the construction of composite indicators is addressed (*e.g.* selection, aggregation and weighting of sub-indicators) and the DEE indicator was established as the mathematical aggregation of the sub-indicators: energy efficiency (EE), thermal comfort (CO), redundancy (RE) and adaptability (AD). Finally, a sensitivity analysis was carried out with different mathematical methods of aggregation and weighting of the sub-indicators that allowed verifying the suitability of the composite indicator to reproduce the behavior of the building, showing that the EES improve the energy performance of the EEB by approximately 48%.

---

\* Master Thesis

<sup>5</sup>Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Master in Electrical Engineering. Director: German Alfonso Osma Pinto. Ph.D in Engineering. Co-director: Julián Ernesto Jaramillo Ibarra. Ph.D in Engineering.

## Introducción

Según estimaciones publicadas por (United Nations Environment Programme, 2022), el consumo energético de las edificaciones, en el cual se incluye la demanda asociada a su operación y la producción de los materiales de construcción (*e.g.*, concreto, ladrillo y vidrio, entre otros), representa aproximadamente el 34% de la demanda de energía a nivel mundial, además que este tipo de infraestructura contribuyen con cerca del 36% de las emisiones de CO<sub>2</sub> (G. Li *et al.*, 2019).

Existen diferentes factores que afectan la demanda de energía de una edificación, entre los que se pueden mencionar el diseño de esta (*e.g.*, componentes arquitectónicos y equipos eléctricos), condiciones externas como cambios climatológicos y eventos disruptivos, y condiciones internas (*e.g.*, hábitos de uso y modificación de uso por espacios de la edificación). En algunos casos, la edificación puede estar sujeta a variaciones de sus condiciones de operación que suponen un incremento de demanda mayor al proyectado en la fase de diseño, por lo que existe la posibilidad de no satisfacer los requerimientos energéticos de esta (Durdyev *et al.*, 2018; Kubwimana & Najafi, 2023; Saka *et al.*, 2021).

Por tal motivo, existe un creciente interés en la implementación de estrategias que mejoren el desempeño energético de las edificaciones teniendo en cuenta criterios de construcción sostenible (CS), al tiempo que se garantiza el confort de los usuarios y se mitiga el impacto ambiental asociado a estas (Gu *et al.*, 2023; G. Li *et al.*, 2019).

El resultado de la aplicación de criterios de CS en las edificaciones se les conoce como edificios verdes (*Green Buildings* en inglés), los cuales implementan diferentes estrategias de eficiencia energética (EEE) que pueden ser clasificadas en técnicas pasivas (*e.g.*, aprovechamiento de iluminación y ventilación natural, uso de elementos de sombra, orientación del edificio según

la incidencia directa del sol) y técnicas activas asociadas a la operación de sistemas mecánicos o eléctricos (*e.g.*, automatización de sistemas, generación eléctrica en sitio) (Belussi *et al.*, 2019; MinMinas, 2022). Estas EEE, en el contexto colombiano, están enmarcadas en el programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía (ProURE<sup>6</sup>), por lo cual se conocen como aplicaciones URE (MinMinas, 2022).

En este sentido, algunos países han desarrollado diferentes normas, códigos y estándares, algunos de carácter internacional, que establecen lineamientos para la eficiencia energética (EE) en edificaciones, entre los cuales se pueden mencionar a BREEAM, estándar ASHRAE 189.1, IgCC, entre otros (Leiringer, 2020). No obstante, autores como (Hwang *et al.*, 2018), (Q. Li *et al.*, 2020), (Saha *et al.*, 2021), (Giorgi *et al.*, 2022) y (Gu *et al.*, 2023) mencionan que existen barreras que limitan la implementación de EEE en edificaciones, las cuales están principalmente relacionadas con altos costos de equipos tecnológicos y falta de políticas locales con incentivos económicos para este tipo de iniciativas.

En Colombia, a partir de la Resolución 0549 de 2015 del MinVivienda<sup>7</sup> se definió el marco regulatorio para la implementación de la EE en el sector construcción, al tiempo que estableció la *Guía de construcción sostenible para el ahorro de agua y energía en edificaciones*, promoviendo de esta manera la EE en el sector construcción (MinVivienda, 2015). En este documento se mencionan principalmente técnicas pasivas para el ahorro y uso eficiente de energía y establecen criterios para alcanzar las metas de ahorro energético en el país.

Por otra parte, autores como (Tronchin *et al.*, 2018) relacionan la respuesta del lado de la demanda (RD), como una técnica activa de EE que pueden ser aplicadas a edificaciones. La RD

---

<sup>6</sup> Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía (PROURE).

<sup>7</sup> Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.

se define como una estrategia que permite obtener ahorros energéticos que incentiva cambios en los patrones de consumo del usuario final, generándole beneficios económicos y mejoras para los sistemas de potencia al balancear la generación con la demanda de energía eléctrica (Charoen *et al.*, 2021; U.S. Department of Energy, 2024).

Asimismo, la RD está definida en el contexto colombiano mediante el marco legal y regulatorio, que establecen las condiciones para implementar un programa de RD en el país, por la Ley 1715 de 2015 y las resoluciones CREG 063 de 2010, 203 de 2013, 011 de 2015 y 029 de 2016, Decreto 2492 de 2014 del MinMinas. Este programa de RD es tipo emergencia, denominado Demanda Desconectable Voluntaria (DDV), el cual incentiva a los usuarios finales a disminuir o cambiar sus hábitos de consumo energía eléctrica, a cambio de unos beneficios económicos. No obstante, estos incentivos solo son a corto plazo, ya que aplica exclusivamente para una condición crítica del mercado de energía eléctrica, es decir, cuando el precio de bolsa supera al precio de escasez para el periodo específico (Vargas Tobón *et al.*, 2019).

Ahora bien, es necesario realizar análisis que permitan evaluar los impactos asociados a la integración de las EEE en el desempeño energético de las edificaciones. Por ello, algunos estudios se enfocan en estimar indicadores como la operación de la edificación, como son el ahorro energético, energía de ciclo de vida, energía embebida (Filippín *et al.*, 2018; Gomes *et al.*, 2021; Shadram & Mukkavaara, 2019; Teng *et al.*, 2021), y métricas como intensidad o uso de energía, costo de energía consumida, confort térmico, ganancias de calor, entre otros (Akkose *et al.*, 2021; Mahiwal *et al.*, 2021; Moazami *et al.*, 2019; Zhu *et al.*, 2020). Los análisis que abordan estos estudios se fundamentan en métodos de variación de parámetros o análisis paramétrico, y enfoques de optimización, muchas veces multiobjetivo (Shadram & Mukkavaara, 2019; Shiel *et al.*, 2018).

La aplicación de los métodos para el análisis de desempeño energético (incluido el aspecto térmico), se basan en herramientas de modelado energético que permiten definir de manera detallada características de operación de la edificación como perfiles de ocupación, envolvente, etc (Cuerda *et al.*, 2020; Del Ama Gonzalo *et al.*, 2023). En la literatura se identifican dos tipos de software para el modelado energético de edificaciones, los motores de simulación (*e.g.*, EnergyPlus, DOE2 y TRNSYS) y software de interfaz gráfica basados en estos motores (*e.g.*, DesignBuilder, eQuest e IES) (Ceballos-Fuentealba *et al.*, 2019; Cho *et al.*, 2019; Cuerda *et al.*, 2020).

Por otra parte, según (Hewitt *et al.*, 2019) y (Geraldi & Ghisi, 2020) las edificaciones pueden ser consideradas como sistemas complejos y su operación, desde un enfoque energético, depende de la interacción de componentes estáticos (*e.g.*, ubicación y materiales de construcción) y dinámicos (*e.g.*, ocupación). De igual manera, esta operación puede ser descrita, individualmente, por características como consumo energético (sistemas HVAC, iluminación, entre otros), carga térmica y uso de la edificación (Fan *et al.*, 2018).

Por esta razón, se considera necesario abordar el análisis del desempeño energético de edificaciones desde un enfoque multidimensional. En este sentido, la construcción de indicadores compuestos (IC), se presenta como una alternativa, ya que es una herramienta útil para describir fenómenos o conceptos multidimensionales mediante la combinación matemática de un grupo de indicadores que evalúan características específicas de este (El Gibari *et al.*, 2021; Kaldas *et al.*, 2021; OECD *et al.*, 2008). El concepto de IC es ampliamente abordado para la evaluación de temas como análisis de riesgos (Feofilovs & Romagnoli, 2017), política pública (Talukder *et al.*, 2017), socioeconómica (Giambona & Vassallo, 2014; Hoffmann *et al.*, 2020), sistemas educativos

(Dominguez-Gil *et al.*, 2021; El Gibari *et al.*, 2018), medio ambiente y sostenibilidad (Burgass *et al.*, 2017; Dočekalová & Kocmanová, 2016).

Algunos estudios mencionan IC relacionados con aspectos de energía, como la seguridad energética (Kelly *et al.*, 2020; Reuter *et al.*, 2020), sostenibilidad energética (Iddrisu & Bhattacharyya, 2015), desarrollo energético (Siksnyte-Butkiene *et al.*, 2021) y resiliencia energética (Gatto & Drago, 2020; Mathew *et al.*, 2021). Además, en la literatura se abordan indicadores empleados para describir aspectos individuales del desempeño de edificaciones como uso de energía, balance de energía, pérdida de energía, eficiencia energética, confort y carga térmica, entre otros (Al Dakheel *et al.*, 2020; Dolge *et al.*, 2020; Y. Li *et al.*, 2017).

No obstante, se evidencia una carencia de indicadores que aborden el desempeño energético de edificaciones (DEE) desde un enfoque multidimensional. En este sentido, este trabajo de investigación propone la construcción de un IC que facilite el análisis del DEE e integre sub-indicadores y métricas relacionadas con aspectos energéticos (energía eléctrica y carga térmica) del comportamiento de una edificación.

En ese contexto, la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T) y el Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica (GISEL), de la Universidad Industrial de Santander (UIS), tienen interés en desarrollar las líneas de investigación sobre eficiencia energética, RD y resiliencia energética.

Este trabajo de investigación tiene como objetivo evaluar los impactos asociados a la integración de aplicaciones URE y el programa RD, establecido en la normativa colombiana, en el desempeño energético de una edificación universitaria. Para ello, se propone la construcción del indicador compuesto de *Desempeño Energético de Edificaciones (DEE)*, que consiste en la

agregación matemática de los subindicadores de eficiencia energética, confort térmico, adaptabilidad y redundancia.

Asimismo, se seleccionó el Edificio de Ingeniería Eléctrica (EIE) como caso de estudio y se propuso una metodología de trabajo compuesta por tres etapas: (i) identificación de posibles sub-indicadores y métricas y recopilación de información sobre las características del estudio de caso, (ii) modelado y simulación del estudio de caso mediante el software DesignBuilder V6, y (iii) construcción del indicador compuesto. Esta última etapa consiste en seleccionar sub-indicadores y métricas, normalizar los datos obtenidos de las simulaciones, ponderar y agregar los datos y validar el indicador propuesto mediante un análisis de sensibilidad.

Cabe mencionar que el desarrollo de este trabajo de investigación se enmarcó en el Proyecto 80740-798-2019 del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (MinCiencias), y contó con el apoyo de los grupos de investigación GISEL<sup>8</sup> y GIEMA<sup>9</sup>. Como resultado de ello, se realizó una ponencia en la versión X SICEL 2021: Transición Energética en la 4ta Revolución Industrial y una publicación en la revista TecnoLógicas, Vol 25, Nro. 52, 2022 (Millán-Martínez *et al.*, 2022).

Por último, este documento está organizado en 8 capítulos y un anexo. En el primer capítulo se presentan los objetivos de este trabajo de investigación. El Capítulo 2 aborda el marco conceptual relacionado a la integración de EEE en edificaciones. Seguido, el Capítulo 3 aborda las

---

<sup>8</sup> Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, UIS.

<sup>9</sup> Grupo de Investigación de Energía y Medio Ambiente, Escuela de Ingeniería Mecánica, UIS.

consideraciones generales para el modelado energético de edificaciones mediante el software DesignBuilder V6 y presenta el proceso de modelado del EIE.

Posteriormente, el Capítulo 4 presenta la configuración de los escenarios de simulación propuestos y los resultados preliminares de las simulaciones de los modelos energéticos desarrollados en el capítulo anterior. El Capítulo 5 aborda el enfoque de indicadores compuestos y se desarrolla la metodología para la construcción del indicador compuesto DEE. Seguido, el Capítulo 6 presenta la aplicación del indicador DEE al EIE y se verifica la idoneidad de este mediante el análisis de sensibilidad, además se estiman los impactos asociados a la integración de las EEE en esta edificación. Finalmente, los capítulos 7 y 8 muestran las conclusiones del trabajo de investigación, recomendaciones y trabajo futuro, respectivamente.

## **1. Objetivos**

A continuación, se describen el objetivo general y los objetivos específicos definidos para el desarrollo de este trabajo de investigación.

### **1.1 Objetivo General**

Estimar el nivel de impacto sobre el desempeño energético del Edificio de Ingeniería Eléctrica debido a la integración de programas de respuesta de la demanda y aplicaciones URE.

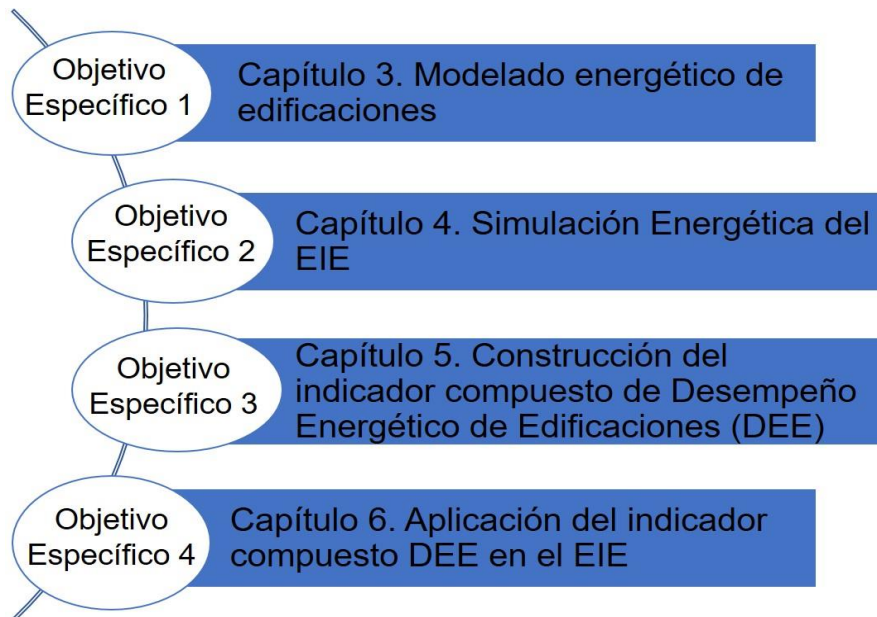
### **1.2 Objetivos Específicos**

- Modelar el Edificio de Ingeniería Eléctrica para la condición actual y de línea base (sin integración de aplicaciones URE) en la herramienta computacional DesignBuilder (v6).
- Simular el comportamiento energético del Edificio de Ingeniería Eléctrica para escenarios definidos.
- Establecer un esquema para cuantificar los impactos sobre el desempeño energético del Edificio de Ingeniería Eléctrica debido a la integración de aplicaciones URE y programas de respuesta de la demanda a partir de la revisión de publicaciones científicas.
- Estimar la influencia de las aplicaciones URE y programas RD en el desempeño del Edificio de Ingeniería Eléctrica.

A continuación, la Figura 1 muestra un esquema de los capítulos donde se desarrollan el cumplimiento de los objetivos específicos.

**Figura 1**

*Esquema del desarrollo de los objetivos específicos del trabajo de investigación.*



## **2. Integración de estrategias de eficiencia energética en edificaciones**

El sector de las edificaciones, que incluye la construcción y operación de estas, es responsable de aproximadamente un tercio del consumo energético mundial y el 40% de las emisiones de CO<sub>2</sub> a nivel global (United Nations Environment Programme, 2022). El consumo de energía de una edificación durante su operación puede variar por diferentes factores como las condiciones climatológicas del entorno, especificaciones técnicas y tipo de materiales implementados en la construcción, nivel de ocupación y uso final de la edificación, entre otros factores relevantes (Dongmei, 2018; Durdyev *et al.*, 2018).

Asimismo, en (Economidou *et al.*, 2020) se menciona que gran parte de la energía usada en las edificaciones se desperdicia debido al uso de técnicas de construcción obsoletas, el uso de equipos poco eficientes y la falta de sistemas de control o gestión de la energía. En este sentido, autores como (He & Chen, 2021; Quirapas-Franco *et al.*, 2021; Zhang & Yong, 2021) mencionan la importancia de la implementación de criterios de sostenibilidad en las prácticas de construcción de edificaciones que permitan mejorar las condiciones de bienestar de sus ocupantes durante todo su ciclo de vida, al tiempo que se reduce el consumo energético de éstas.

### **2.1 Edificaciones verdes y construcción sostenible**

En el mundo se promueve el concepto de las edificaciones verdes (GB, siglas en inglés) como una estrategia efectiva para cumplir los objetivos del desarrollo sostenible (ODS), principalmente en la construcción de ciudades y sociedades sostenibles (United Nations Environment Programme, 2022). Las GB son estructuras que integran diferentes iniciativas sostenibles en todas las fases del ciclo de vida de ésta (diseño, construcción, operación,

mantenimiento, renovación y demolición) con el fin de minimizar o eliminar los impactos negativos al medio ambiente (Shams & Rahman, 2017). Por otra parte, los GB conllevan potenciales beneficios en los aspectos ambientales y económicos, entre los cuales se pueden mencionar los siguientes:

- Mejoramiento de la calidad del aire y agua.
- Reducción de los residuos y costos operativos.
- Conservación de recursos naturales.
- Mejoramiento de la productividad, comodidad y salud de los ocupantes.
- Optimización del rendimiento económico del ciclo de vida.
- Aumento de las cualidades estéticas.
- Minimización de la presión sobre la infraestructura local.

En (Leiringer, 2020) se menciona que la definición de GB fue propuesta formalmente en la década de los 90's y a partir de ese momento se han desarrollado estándares y códigos en varios países para facilitar la adopción de este concepto en el sector de la construcción. La adopción de estándares o códigos, algunos de obligatorio cumplimiento y otros de adopción voluntaria, han ido en crecimiento los últimos años; a pesar de esto, alrededor de dos tercios de los países no cuentan con ningún tipo de código para CS (United Nations Environment Programme, 2022). Lo anterior, sumado a los altos costos de equipos tecnológicos, falta de incentivos económicos para este tipo de iniciativas de ahorro energético, entre otros, constituyen barreras que limitan la construcción de edificaciones sostenibles o verdes (Gu *et al.*, 2023; Hong *et al.*, 2018; Hwang *et al.*, 2018; Leiringer, 2020; Quirapas-Franco *et al.*, 2021). La Tabla 1 lista algunos estándares, códigos o certificaciones que se identificaron en la revisión bibliográfica de este trabajo de investigación (Jamoussi *et al.*, 2022; Jiménez-Pulido *et al.*, 2022; Wei *et al.*, 2022).

**Tabla 1**

*Listado de códigos, estándares y certificaciones para CS.*

Estándar/Código	Entidad	País	Clase
IgCC	International Code Council	USA	Código modelo
ASHRAE 189.1	ANSI/ASHRAE/USGBC/IES	USA	Código modelo
Green Globes	Green Buildings Council	USA	Sistema de clasificación y certificación
LEED	US Green Code Council	USA	Sistema de clasificación y certificación
ICC 700	International Code Council	USA	Sistema de clasificación y certificación
Living Buildign Challenge 2.1	International Living Future Institute	USA	Sistema de clasificación y certificación
BREEAM	BREE Global	USA	Sistema de clasificación y certificación
Net Zero Energy Building Certification	International Living Future Institute	USA	Sistema de clasificación y certificación
BCA Green Mark Scheme	Building and Construction Authority (BCA)	Singapur	Sistema de clasificación y certificación
BEAM	Business Environment Council	Hong Kong	Sistema de clasificación y certificación
CASBEE	Japan Sustainable Building Consortium (JSBC)	Japón	Sistema de clasificación y certificación
EDGE	International Finance Corporation (IFC)	USA	Sistema de clasificación y certificación
Green Star SA	Green Building Council of South Africa	Sudáfrica	Sistema de clasificación y certificación
Pearl Rating System for Estidama	Abu Dhabi Urban Planning Council	Emiratos Árabes Unidos	Sistema de clasificación y certificación
Green Star	Green Building Council Australia	Australia	Sistema de clasificación y certificación
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen	Alemania	Sistema de clasificación y certificación

### ***2.1.1 Contexto colombiano sobre construcción sostenible***

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MinAmbiente) define la construcción sostenible como la adopción de prácticas de diseño, construcción, operación y mantenimiento de edificaciones desde un enfoque ambiental, económico y social, que tiene como fin de mantener un

equilibrio entre el medio ambiente y el espacio construido (MinAmbiente, 2024). En este sentido, el gobierno colombiano, por medio de la Resolución 0549 de 2015 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Desarrollo (MinVivienda), adoptó la *Guía de construcción sostenible para el ahorro de agua y energía en edificaciones*, donde se abordan las consideraciones técnicas para la construcción de edificaciones, basado en el uso final y las condiciones bioclimáticas (MinVivienda, 2015).

Además, el MinAmbiente en 2012 publicó el documento *Criterios ambientales para el diseño y construcción de vivienda urbana*, enfocado exclusivamente en edificaciones de tipo residencial y que contempla un enfoque preventivo al uso racional de recursos renovables (MinVivienda, 2015). La Tabla 2 presenta el marco regulatorio para la CS en Colombia (García-Sepúlveda, 2016).

**Tabla 2**

*Marco regulatorio para el desarrollo de la CS en Colombia.*

Norma	Entidad	Año	Descripción
Ley 143 de 1994	Congreso de Colombia	1994	Adopción del concepto de uso eficiente de la energía en el sector eléctrico
Resolución 541 de 1994	MinAmbiente	1994	Lineamientos para disposición final de residuos de construcción
Ley 373 de 1997	Congreso de Colombia	1997	Establece el programa para el uso eficiente y ahorro de agua
Decreto 3102 de 1997	Presidencia de Colombia	1997	Reglamenta la instalación de equipos y sistemas de bajo consumo de agua
Decreto 1052 de 1998	Presidencia de Colombia	1998	Reglamenta las disposiciones para licencias de construcción y urbanismo
Ley 697 de 2001	Congreso de Colombia	2001	Fomenta el uso racional y eficiente de la energía (URE)
Documento CONPES 3343	MinAmbiente	2005	Lineamiento y estrategias de desarrollo sostenibles
Resolución 1555 de 2005	MinAmbiente	2005	Uso del Sello Ambiental Colombiano
Plan Nacional de Desarrollo 2006-2010	DNP <sup>10</sup>	2006	Definición de gestión ambiental

<sup>10</sup> Departamento Nacional de Planeación.

Norma	Entidad	Año	Descripción
Decreto 2501 de 2007	MinMinas	2007	Promove practicas con fines de uso racional y eficiente de energía eléctrica
Plan nacional de Desarrollo 2010-2014	DNP	2010	Adopción del concepto de vivienda y ciudades amables
Decreto 180919de 2010	MinMinas	2010	Se adopta el Plan de Acción Indicativo 2010-2015 (PAI-PROURE)
Criterios ambientales para el diseño y construcción de vivienda urbana	MinAmbiente	2012	Establece criterios para construcción de edificaciones residenciales atendiendo objetivos de sostenibilidad ambiental
Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018	DNP	2014	Adopción de marco regulatorio para la construcción sostenible
Decreto 1285 de 2015	MinVivienda	2015	Establece los lineamientos de construcción sostenible
Resolución 0549 de 2015	MinVivienda	2015	Establece la Guía de construcción sostenible para el ahorro de agua y energía en edificaciones

### ***2.1.2 Aplicaciones de uso racional y eficiente de energía (URE)***

La Ley 697 de 2001 estableció el marco legal para la eficiencia energética en Colombia, la cual define que el Uso Racional y Eficiente de Energía (URE) como asunto de interés social, público y de convivencia nacional. En este sentido, el Ministerio de Minas y Energía (MinMinas), mediante la Resolución 40156 de 2022 adoptó el Plan Indicativo 2022-2030 para desarrollar el Programa URE (PROURE), que tiene como fin reducir la brecha tecnológica en el uso de la energía por medio del uso de estrategias de eficiencia energética (MinMinas, 2022).

En el contexto colombiano, las estrategias de eficiencia energética (EEE) también son conocidas como aplicaciones de Uso Racional y Eficiente de Energía (URE). Estas EEE son medidas encaminadas a la eficiencia energética de edificaciones y se pueden clasificar de manera general en dos categorías, a saber, estrategias pasivas y activas.

**2.1.2.1 Estrategias pasivas.** Según el Anexo 1 de la Resolución 0549 de 2015, las medidas de ahorro energético tipo pasivo se incorporan al diseño arquitectónico de la edificación sin la intervención de sistemas mecánicos y/o eléctricos, permitiendo aprovechar las condiciones

ambientales del entorno, maximizando las fuentes de control térmico, ventilación y reducción energética naturales para crear condiciones de confort para sus ocupantes (MinVivienda, 2015).

De forma general, las estrategias pasivas pueden ser agrupadas en tres componentes, i) iluminación, ii) ventilación y iii) envolvente de la edificación, los cuales conforman una sinergia dentro del mismo, por lo cual es necesario realizar un diseño bioclimático (MinVivienda, 2015). En relación a la envolvente de la edificación, las estrategias esta encaminadas en reducir las ganancias solares, por medio de dispositivos de sombreado, mejoramiento de relación ventana-pared (RVP), cubiertas verdes (techos o paredes), mejorar orientación de la edificación, entre otras.

**2.1.2.1 Estrategias activas.** Las medidas activas consisten en el uso de sistemas mecánicos y/o eléctricos para crear condiciones de confort al interior de las edificaciones, tales como calderas y aire acondicionado, ventilación mecánica, iluminación eléctrica, entre otras (MinVivienda, 2015).

Ahora bien, algunos estudios mencionan que la implementación de sistemas de automatización para el control de algunos subsistemas de la edificación, denominados BAS (siglas en inglés), como una herramienta necesaria para integrar los diferentes sistemas del edificio y mejorar el desempeño energético de éste (Osma *et al.*, 2015). Un BAS es un sistema de control automático, generalmente centralizado, de dispositivos y recursos dentro de una edificación, el cual se compone de sensores y controladores que permiten ajustar las condiciones del entorno como climatización, iluminación, entre otros (Osma *et al.*, 2015; Qiang *et al.*, 2023; Van Thillo *et al.*, 2022).

## 2.2 Gestión de la demanda

Uno de los aspectos claves para la integración de las aplicaciones URE se encuentra en la gestión de las estrategias activas. Se entiende por gestión de la demanda al conjunto de estrategias o técnicas orientadas a producir cambios en la demanda por parte del usuario final, los cuales consisten en el traslado y/o reducción del consumo de energía, tomando como base un perfil de consumo normal (Corbett *et al.*, 2018; Puttamadappa & Parameshachari, 2019).

De manera general, los esquemas de DSM integran principalmente dos componentes, que son la respuesta del lado de la demanda (RD) y eficiencia energética (DNP & Enersinc, 2017; Mariano-Hernández *et al.*, 2021; Puttamadappa & Parameshachari, 2019) (ver Figura 2). Según el DNP (DNP & Enersinc, 2017), es necesario tener en cuenta algunos aspectos para una efectiva gestión de la demanda, estos son el diseño tarifario, incentivos económicos, acceso a información, tecnologías de control, mecanismos de verificación y nuevas empresas de servicio.

**Figura 2**

*Componentes de un sistema de DSM. Adaptado de (DNP & Enersinc, 2017).*

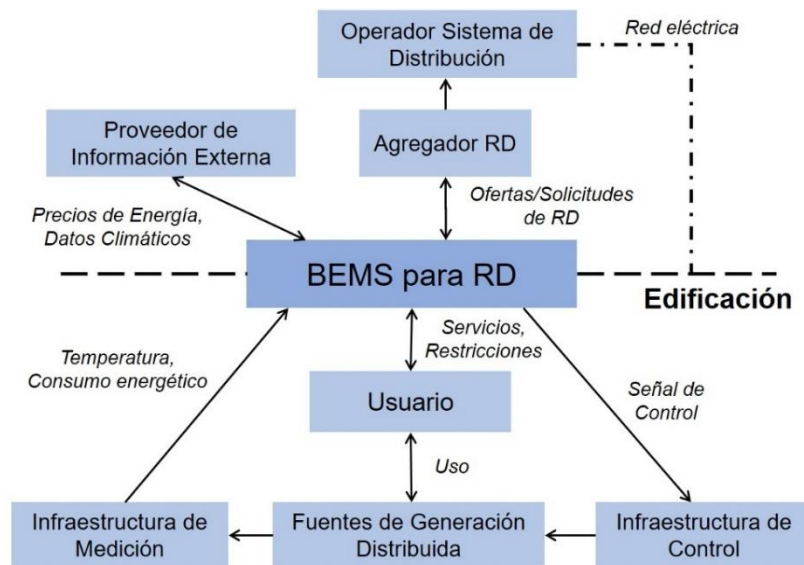


Algunos estudios abordan la implementación de esquemas DSM desde un enfoque de optimización, tal que permita maximizar los beneficios financieros asociados a los incentivos, costos de operación del sistema en estudio y mejorar la eficiencia energética de este (Elamin & Shaaban, 2019; Karimi & Jadid, 2020).

Por ello, es necesario plantear un sistema centralizado de control denominado BEMS o BAS (siglas en inglés), el cual permite centralizar la información y se encarga de la operación adecuada de ésta, teniendo en cuenta los parámetros definidos para programa RD, así como las variables externas e internas (condiciones climáticas, de carga y precios de la electricidad) (Mancini *et al.*, 2019; Osma *et al.*, 2015; Qiang *et al.*, 2023). La Figura 3 presenta un esquema para la implementación de DSM por medio de BEMS.

**Figura 3**

*Esquema de DSM implementando BEMS. Adaptado de (Rotger-Griful et al., 2017).*



### ***2.2.1 Respuesta del lado de la demanda (RD)***

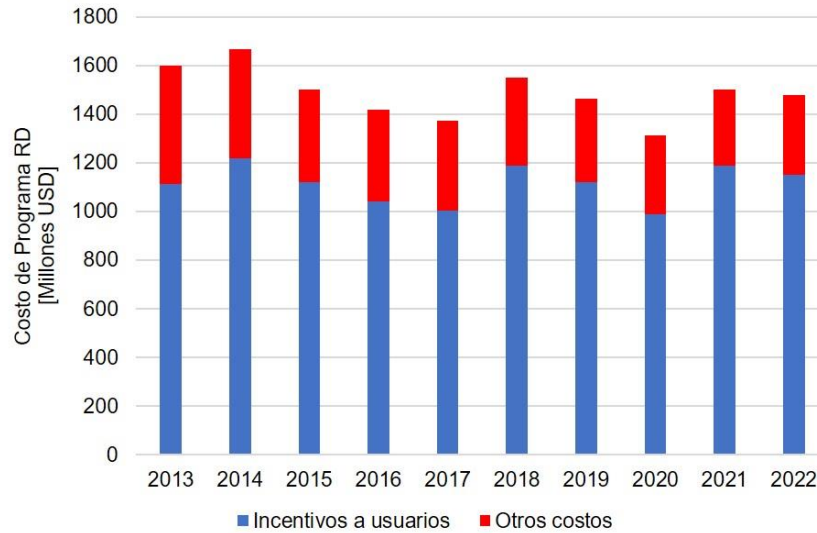
El concepto de respuesta del lado la demanda (RD) se define como aquellas acciones encaminadas a modificar los hábitos de consumo de energía eléctrica por parte del usuario final, con base a patrones normales de consumo, en relación a señales de precio o incentivos económicos establecidos en la reglamentación de cada país (U.S. Department of Energy, 2024). Estas acciones se agrupan en programas de RD, los cuales son propuestos por los operadores de los sistemas eléctricos, con el fin de mejorar la eficiencia y confiabilidad de éstos, además de flexibilizar los mercados de energía eléctrica en los diferentes países (Charoen *et al.*, 2021; D'Oca *et al.*, 2018; González-Torres *et al.*, 2022; Mutani *et al.*, 2020; Vahid-Ghavidel *et al.*, 2020).

Los programas RD representan beneficios económicos para el usuario final, ya sea por disminución del consumo de energía o incentivos estipulados en los diferentes programas RD. Además, según diferentes autores, estos permitirían una mayor integración de FNCER en sistemas eléctricos, en especial edificaciones (Pina *et al.*, 2012). La Figura 4 muestra los beneficios económicos asociados a programas de RD en EE.UU.

Asimismo, los programas de RD se pueden clasificar en dos categorías: programas basados en precios (PBP) y basados en incentivos (PBI), los primeros están normalmente orientados a usuarios residenciales y comerciales, mientras que los segundos se enfocan en grandes usuarios industriales y comerciales (Aalami *et al.*, 2019; IEA, 2023). La Figura 5 muestra algunos tipos de programas de RD encontrados en la literatura.

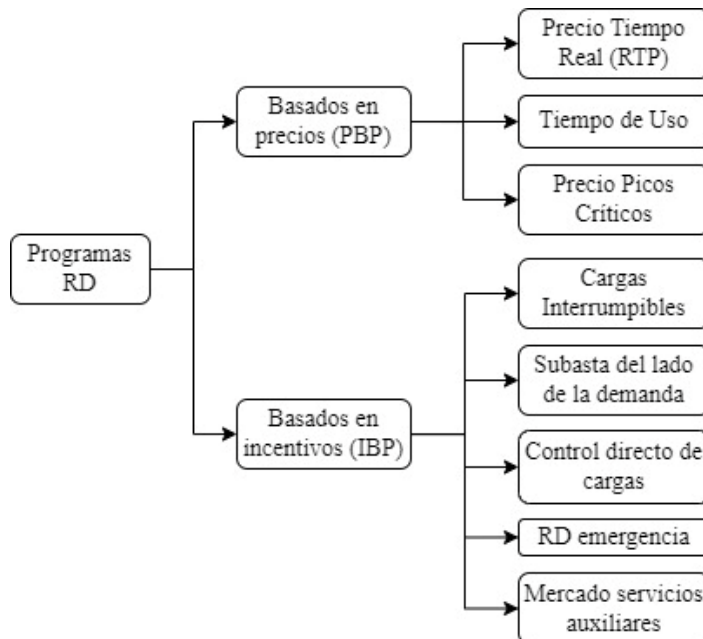
**Figura 4**

*Beneficios de los programas de Respuesta de la Demanda (RD) en EE.UU. Fuente: Base de datos U.S. Energy Information Administration (EIA).*



**Figura 5**

*Clasificación programas de Respuesta de la Demanda (RD). Adaptado de (Aalami et al., 2019)*



### 2.2.1 Marco regulatorio colombiano para la RD

La Resolución CREG 063 de 2010 reguló el anillo de seguridad del Cargo por Confiabilidad, denominado Demanda Desconectable Voluntaria (DDV); este permitía al usuario o un grupo de usuarios, representados por un comercializador, ofertar reducciones de su consumo de energía en el MEM<sup>11</sup>.

Si bien, este esquema puede ser considerado como un programa basado en incentivos tipo emergencia, la Resolución CREG 063 de 2010 no establece de manera clara los mecanismos para la gestión de RD (Castañeda-Hernández, 2018). Solo hasta el año 2014, con la expedición de la Ley 1715, se establece el marco legal que fomenta la adopción de iniciativas de eficiencia energética y programas de RD en Colombia. Como respuesta a ello, la CREG mediante la Resolución 011 de 2015, y subsiguientes resoluciones que la modifican, reglamentó el programa de RD aplicable en Colombia, el cual toma como base el esquema DDV establecido en la Resolución 063 de 2010, manteniendo la esencia de un programa RD de emergencia. La Tabla 3 muestra, en resumen, el marco legal y regulatorio de RD en Colombia.

**Tabla 3**

*Marco regulatorio colombiano para la RD.*

Norma	Entidad	Alcance
Resolución 063 de 2010	CREG	Establece la anillo de seguridad DDV
Resolución 203 de 2013	CREG	Modifica la Resolución 063 de 2010 en relación con la verificación y liquidación de la DDV
Ley 1715 de 2014	Congreso de la República	Define marco legal para la promover las FNCER, iniciativas de eficiencia energética y RD en Colombia
Decreto 2492 de 2014	MinMinas	Delega a la CREG para establecer mecanismo para RD
Resolución 011 de 2015	CREG	Regula el programa de RD para el mercado diario en condición crítica

<sup>11</sup> Mercado de Energía Mayorista.

Los usuarios que deseen participar de este programa de RD lo harán por medio de un comercializador de energía (Agregador de RD), el cual puede ser el mismo operador de la red eléctrica. Este será el encargado de enviar al CND las ofertas de precio de reducción de energía para las 24 horas, según el formato de activación establecido por esta entidad. El CND calculará el consumo de energía a reducir por el programa RD, tal que el precio de bolsa de predespacho ideal sea mayor o igual al 108% del precio de escasez (PE), y dará aviso de activación del programa RD al comercializador cuando este valor a disminuir sea mayor que cero.

Asimismo, la verificación de la reducción de energía por el programa RD se realiza a partir de dos tipos de fronteras de DDV, línea de base de consumo (LBC) y medición directa de reducción de la energía, la cual se divide en RD con plantas de emergencia y con medición independiente. Por último, el ASIC verificará las reducciones de energía correspondiente al tipo de frontera del usuario y procederá a liquidar los valores a favor de estos como se presenta en la Ecuación 1.

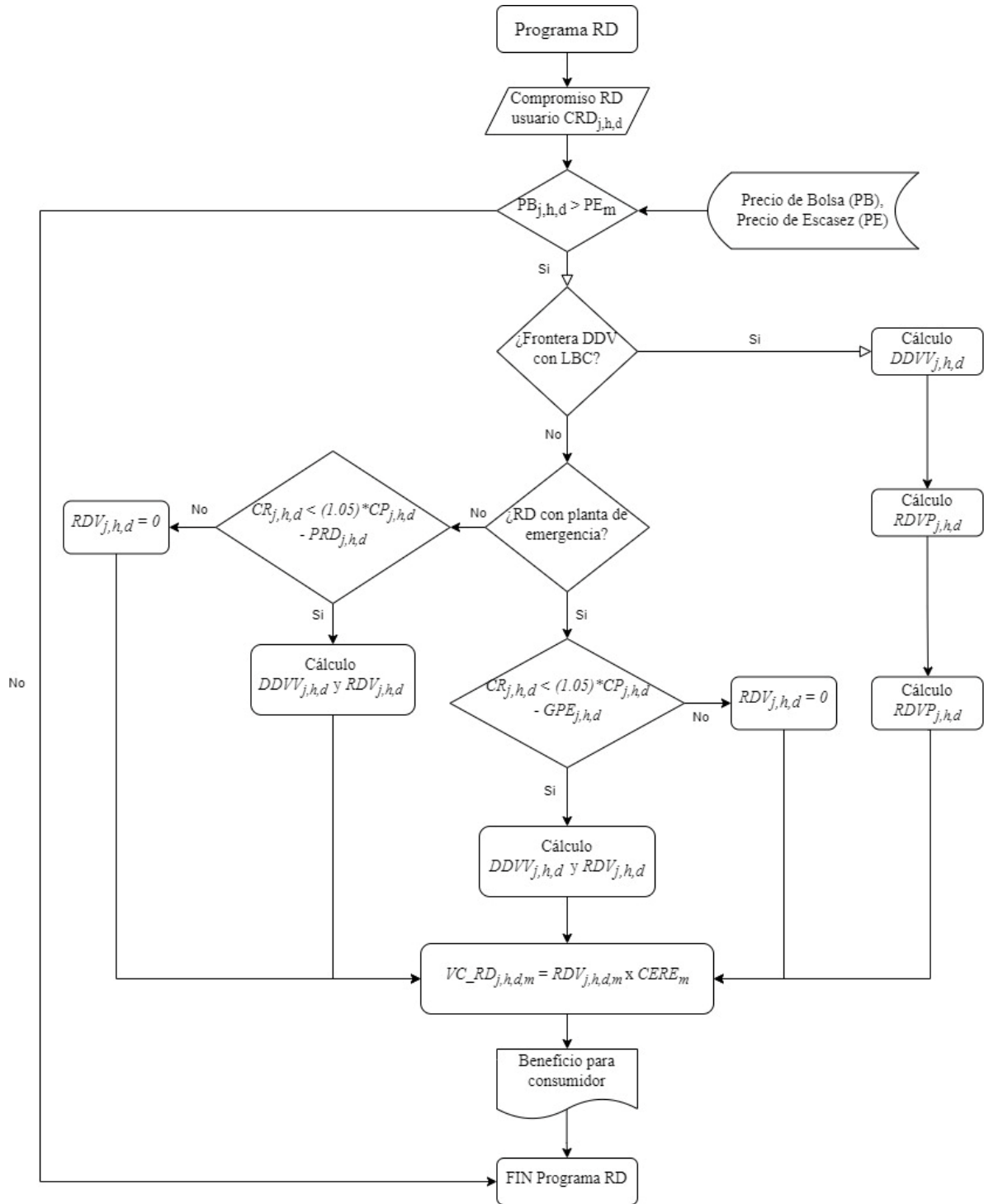
$$VC_{RD_{c,h,d,m}} = RDV_{c,h,d,m} * CERE_m \quad (1)$$

Donde  $VC_{RD_{c,h,d,m}}$ : Valor del comercializador c por la reducción de demanda del programa RD en la hora h del día d del mes m;  $RDV_{c,h,d,m}$ : RD verificada del comercializador;  $CERE_m$ : Costo Equivalente Real en Energía del mes m.

A continuación, la Figura 6 presenta el esquema para la implementación del programa de RD que fue definido en la Resolución 011 de 2015.

**Figura 6**

*Esquema de aplicación del programa de RD establecido en la Resolución CREG 011 de 2015.*



### 3. Modelado energético de edificaciones

Este capítulo presenta una descripción de los componentes constructivos del EIE y se aborda el proceso de modelado con la herramienta DesignBuilder V6, que fue empleada para la elaboración del modelo energético de la edificación sujeta al caso de estudio.

#### 3.1 Descripción constructiva del caso de estudio (EIE)

El Edificio de Ingeniería Eléctrica (EIE) fue seleccionado como caso de estudio para este trabajo de investigación, ya que cuenta con diferentes estrategias de eficiencia energética pasivas y activas integradas a la edificación después de ser remodelada en el año 2012, con el fin de aprovechar las condiciones ambientales de su entorno, disminuir el consumo energético y garantizar las condiciones de confort al interior de ésta. Otro criterio que se tuvo en cuenta para la selección de esta edificación fue la disponibilidad de información relacionada con las características constructivas (planos As-Built, materiales, etc) y operativas (equipos eléctricos, perfiles de ocupación, etc) del EIE, las cuales fueron recopiladas en (Adarme *et al.*, 2014; Anaya *et al.*, 2013; Cárdenas-Rangel, 2017).

Esta edificación hace parte del complejo universitario de la Universidad Industrial de Santander, ubicado en Bucaramanga (7,13° latitud norte, 73,13° longitud oeste, 960 (m.s.n.m)). Esta ciudad presenta unas condiciones de clima cálido con temperaturas promedio diaria y máxima de 24°C y 31°C, respectivamente, además de precipitaciones anuales promedio de 1279 (mm). La irradiación solar oscila entre 2,0 (kWh/m<sup>2</sup>) y 7,6 (kWh/m<sup>2</sup>), con un promedio de 4,8 (kWh/m<sup>2</sup>) (Osma-Pinto & Ordóñez-Plata, 2019).

Referente a las características arquitectónicas del EIE, esta es una edificación de aproximadamente 2700 (m<sup>2</sup>) los cuales están distribuidos en 5 niveles o pisos, con áreas dedicadas a aulas de clase, salas de estudio individuales y grupales, oficinas para profesores y administrativas, entre otros espacios. Asimismo, durante la etapa de remodelación del EIE se utilizaron materiales y técnicas constructivos convencionales como ladrillo hueco y *drywall* para los muros y divisiones interiores y exteriores. Por otra parte, esta edificación tiene aproximadamente un 70% de acristalamiento (ventanas) con vidrio tipo incoloro de 3 (mm) (Cárdenas-Rangel, 2017).

Ahora bien, en relación a las estrategias de eficiencia energética, el EIE tiene un sistema de tubos solares (23 en total) y cubiertas verdes ubicadas en las terrazas de los pisos 4 y 5 del edificio. Además, con el fin de reducir las ganancias térmicas en muros y ventanas exteriores, se instalaron elementos de sombreado sobre algunas superficies de la fachada sur de la edificación.

Por último, el edificio tiene instalado un sistema de generación fotovoltaica (FV), el cual se divide en las unidades SFV1 y SFV2 (37 paneles FV con 9.63 (kW) de capacidad instalada) y la unidad SFV3 (6 paneles FV con 1.92 (kW) de capacidad instalada) ubicados en las terrazas de del piso 4 y 5 (Osma-Pinto & Ordóñez-Plata, 2019). A continuación, la Figura 7 y la Tabla 4 presentan respectivamente la vista de la facha sur y un resumen de las características más relevantes del EIE.

**Tabla 4**

*Resumen de las características y componentes del EIE.*

Componente o característica	Descripción
Localización	7.13° Norte, 73.13° Oeste
Altitud	960 (msnm)
Área aprox.	2 700 (m <sup>2</sup> )
Ocupación aprox.	1 400 personas
Orientación (fachada principal)	Sur-Norte
Distribución de pisos	5 pisos y un sótano
Tipo de uso de los espacios	Aulas de clase, sala de estudio, oficinas de profesores y personal administrativo
Área cubierta verde	580 (m <sup>2</sup> )
Sistema FV	18 paneles FV (9.63 (kWp)) y 6 paneles FV (1.92 (kWp))
Sistema de tubo solares	6 tubos de 25 (cm) y 17 tubos de 35(cm)

**Figura 7**

*Vista de la fachada sur del EIE.*



### **3.2 Elaboración del modelo energético del EIE**

El proceso de modelado energético de una edificación puede abordarse mediante el uso de herramientas de simulación que permiten estimar el comportamiento energético de estos. Según (Bharath *et al.*, 2021; Del Ama Gonzalo *et al.*, 2023; Elnabawi, 2020), estas herramientas se pueden clasificar en dos categorías, motores de simulación energética (*e.g.*, EnergyPlus, DOE-2, TRNSYS, BLAST) y software de interfaz gráfica para el usuario, GUI por sus siglas en inglés (*e.g.* DesignBuilder, eQuest, etc.).

Para la elaboración del modelo energético del EIE se seleccionó la herramienta DesignBuilder (versión 6), ya que es una herramienta desarrollada con base al motor de simulación EnergyPlus, facilitando al usuario elaborar geometrías de edificaciones relativamente complejas de forma intuitiva, al tiempo que puede configurar de manera detallada los diferentes componentes del edificio como materiales constructivos (muros, ventanas, puertas, etc), ocupación, equipos eléctricos y sistemas de climatización, establecer variables climáticas y de orientación del edificio (Bharath *et al.*, 2021).

Ahora bien, el primer paso en el proceso de modelado es definir la ubicación de la edificación y las variables meteorológicas de su entorno, como se muestra en la Figura 8. Por ello, se seleccionó el archivo de variables meteorológicas de la ciudad de Bucaramanga que fue desarrollado en (Cárdenas-Rangel, 2017).

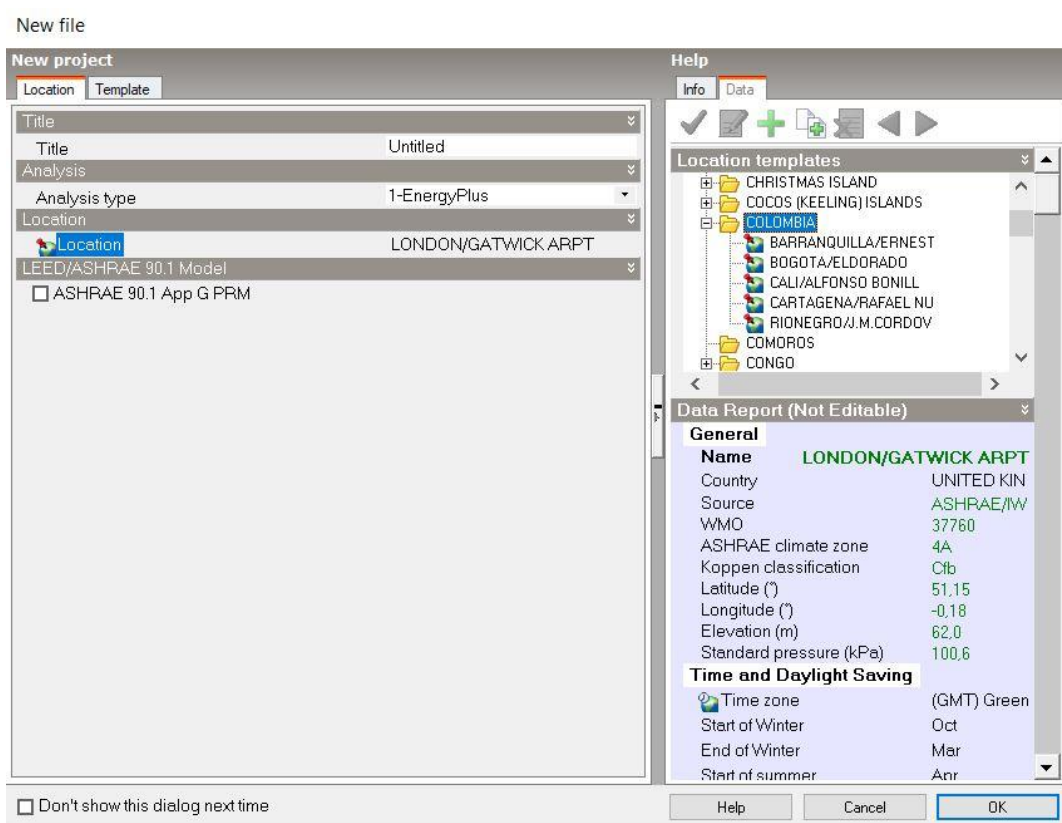
#### ***3.2.1 Modelado 3D de la edificación***

Para definir la geometría del modelo energético del EIE se tomó como base los planos As-Built de la edificación, que fueron ingresados a DesignBuilder mediante la opción Import 2-D drawing. A

partir de esta guía, se insertaron los bloques que representaran los diferentes niveles del EIE y se realizó el trazado de las divisiones interiores para definir los diferentes espacios del edificio.

### Figura 8

*Asignación de ubicación del modelo y las variables meteorológicas de la envolvente.*



Posteriormente, haciendo uso de las herramientas de dibujo de DesingBulder se establecieron las aberturas (puertas, ventanas y vacíos) de los diferentes espacios del EIE, además de agregar los elementos arquitectónicos como escaleras, elementos de sombreado, entre otros.

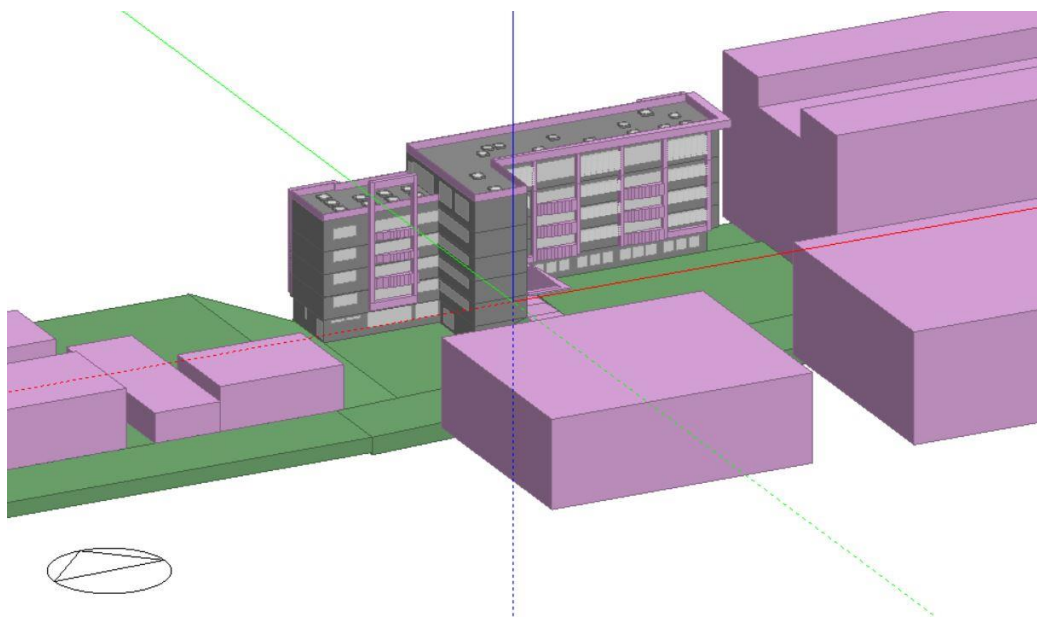
Ahora bien, algunos estudios como (Bouyer *et al.*, 2011) indican que el contexto urbano de la edificación puede impactar negativamente el desempeño de ésta, en especial en el incremento

del consumo energético de los sistemas HVAC. Por tal motivo, los edificios contiguos al EIE se incorporaron a los modelos virtuales como bloques componentes, simplificando la geometría de estos (ver Figura 10).

Finalmente, para integrar los tubos solares al modelo 3D del EIE fue necesario realizar algunas aproximaciones desarrolladas en (1), esto debido a que DesignBuilder no incluye este tipo de estrategia de eficiencia energética. A continuación, la Figura 9 presenta el modelo 3D del EIE elaborado con el software DesignBulder V6 para las condiciones actuales de la edificación.

### Figura 9

*Modelo 3D del EIE para condiciones actuales elaborado en DesignBuilder.*



### ***3.2.2 Caracterización de los componentes del EIE***

Posterior a la elaboración de modelo 3D, fue necesario configurar y asignar los valores a los diferentes componentes del EIE, para lo cual DesignBuilder tiene definido las opciones de *Activity*, *Construction*, *Openings*, *Lighting* y *HVAC*.

En la opción *Activity* se definieron los parámetros de uso y ocupación (número de ocupantes, temperatura de funcionamiento del sistema de refrigeración, ganancias térmicas asociadas a equipos de cómputo, ofimáticos, misceláneos, cocina, entre otros) para cada uno de los espacios del modelo. Por otra parte, en *Construction* se asignan las características de los muros interiores y exteriores, placas, cubiertas planas e inclinadas, además de cubiertas verdes.

En relación a las puertas, ventanas y vacíos del EIE, con la opción *Openings* se estableció el tipo, grosor y material de los elementos, además del porcentaje y horario de apertura de las ventanas y se definió cuales espacios contaban con ventilación natural. Es necesario mencionar que en Colombia no existen estudios de caracterización de los materiales empleados en el sector construcción del país, por lo que se seleccionaron los datos de materiales usados en (Cárdenas-Rangel *et al.*, 2022) que más se aproximen a los identificados en el EIE.

Ahora bien, la asignación de las potencias, tipo y ubicación de luminarias, tipo de control del sistema de iluminación (en caso de que aplique) para cada área del modelo se realizó mediante la opción *Lighting*. Mientras que los parámetros del sistema de climatización artificial se asignaron con la opción *HVAC*, en la cual se definió el tipo de sistema, el COP, entre otros.

La Tabla 5 presenta algunos datos asignados para el modelo energético del EIE, los demás valores y parámetros del modelo se presenta de manera detalla en el Anexo 1. Posterior a la asignación de todos los parámetros de los diferentes componentes del modelo 3D, se procedió a exportar la imagen

renderizada del modelo energético del EIE mediante la opción *Visualize* de DesigBuilder (ver Figura 10).

**Tabla 5**

*Características de elementos constructivos para el modelo energético del EIE.*

Elemento	Material	Espesor (m)	Valor U
Muros exteriores e interiores	Muro Drywall	0,15	2,061
	Ladrillo hueco recubierto de mortero	0,15	1,47
Suelos y pisos	Concreto aligerado	0,4	1,603
Cubierta	Concreto aligerado	0,4	1,603
	Cubierta verde	0,71	0,358
Ventanas	Vidrio sencillo (SHGC = 0,85)	0,04	5,871
Puertas	Roble	0,01	2,823
	Celosía metálica	0,035	5,858

Si bien DesignBuilder V6 incorpora una opción para el dimensionamiento de sistemas FV, la cual no fue tomada en cuenta porque el sistema FV del EIE se simuló de una forma simplificada, que se explica con más detalle en el próximo capítulo.

### 3.3 Elaboración del modelo de línea base del EIE

Con el fin de evaluar el comportamiento energético del EIE, es necesario establecer una línea de referencia (modelo de línea base) que permita evaluar la incidencia de las estrategias de eficiencia energética sobre la edificación. Para esto, se adoptaron los lineamientos establecidos en el Apéndice G del Estándar ASHRAE 90.1, específicamente las secciones 5 a 10 de este.

La elaboración del modelo de línea base toma como punto de partida el modelo energético del EIE (condiciones actuales), al cual se modificaron algunos elementos como la relación muro-ventana, sistema HVAC, sistema de iluminación, además de la eliminación de las estrategias de eficiencia energética (tubos solares y elementos de sombreado). A continuación, la Figura 11 presenta el modelo de línea base elaborado con DesignBuilder V6 y la Tabla 6 muestra algunas de las características de los elementos constructivos de este.

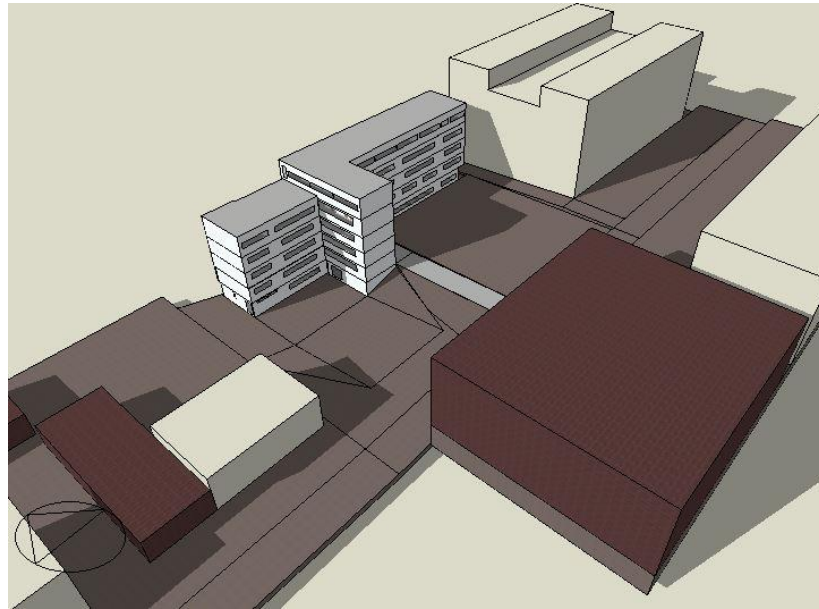
**Figura 10**

*Modelo 3D del EIE para condiciones actuales elaborado en DesignBuilder.*



**Figura 11**

*Modelo energético de línea base del EIE.*



**Tabla 6**

*Características de elementos constructivos para el modelo energético de línea base del EIE.*

Elemento	Material	Espesor (m)	Valor U
Muros exteriores e interiores	Muro Drywall	0,15	2,061
	Ladrillo hueco recubierto de mortero	0,15	1,47
Suelos y pisos	Concreto aligerado	0,4	1,603
Cubierta	Concreto aligerado	0,4	1,603
	Cubierta verde	0,71	0,358
Ventanas	Vidrio sencillo (SHGC = 0,85)	0,04	5,871
Puertas	Roble	0,01	2,823
	Celosía metálica	0,035	5,858

#### **4. Simulación energética del Edificio de Ingeniería Eléctrica (UIS)**

Este capítulo presenta las generalidades de la herramienta de simulación DesignBuilder V6 en relación a la configuración de las simulaciones de los modelos energéticos presentados en el capítulo anterior. Asimismo, se describen los escenarios de simulación planteados con el fin de evaluar de manera individual las estrategias de eficiencia energética del EIE y por último se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas.

##### **4.1 Configuración de parámetros de simulación en DesignBuilder V6**

DesignBuilder incorpora cuatro algoritmos de solución general para el intercambio térmico en los elementos constructivos de la edificación, estos son Función de Transferencia por Conducción (CTF), Diferencias Finitas, Calor y Humedad por Elementos Finitos (HAMT) y Función de Transferencia por Conducción con Penetración de Humedad (EMPD) (DesignBuilder Software Ltd, n.d.).

Para fines de este trabajo, se seleccionó CTF como algoritmo de solución general ya que permite calcular el calor sensible sin tener en cuenta el almacenamiento o la difusión de humedad en los elementos de constructivos, además es el algoritmo usado por defecto en el motor de cálculo EnergyPlus y DesignBuilder.

Por otra parte, muchas edificaciones pueden ser simuladas de manera adecuada con una o dos etapas de cálculo por hora, pero (DesignBuilder Software Ltd, n.d.) recomienda que para edificaciones con sistemas de HVAC es necesario configurar seis etapas de cálculo por hora. Asimismo, se configuraron las opciones de cálculo para un periodo de simulación anual (enero a diciembre), con intervalos horarios para los resultados de las simulaciones.

#### **4.2 Descripción de los escenarios de simulación**

Aparte de los modelos de condiciones actuales y de línea base del EIE (escenarios de simulación ES1 y ES2, respectivamente), se plantearon otros seis (6) escenarios de simulación en donde se modificó el modelo de línea base para integrar individualmente algunas estrategias de eficiencia energética de la edificación.

Además, se plantearon dos escenarios de simulación en los cuales se modificó el parámetro de ocupación, incremento de la densidad de ocupantes de 30% y 50% respectivamente, en cada espacio del modelo de energético del EIE. Sin embargo, estos escenarios fueron descartados del análisis de este trabajo de investigación, ya que los resultados de las simulaciones no presentan variaciones en el consumo energético, tanto para los sistemas de iluminación, HVAC y demás cargas, en cada uno de estos escenarios. Esto se debe principalmente a que la configuración del funcionamiento de estos equipos está definida por un perfil de uso horario y no depende directamente de la densidad de personas en cada espacio del EIE.

Por otra parte, se propuso un escenario de simulación en el cual se modifican el archivo de variables meteorológicas del modelo de condiciones actuales del EIE, esto con el fin de evaluar la capacidad de adaptabilidad de la edificación ante variaciones de las condiciones climáticas del entorno. La elaboración de los archivos de variables meteorológicas modificados se realizó con la herramienta *Meteonorm* y se tomó en cuenta el escenario de cambio climático A2 planteado por el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), siendo esta las proyecciones más calurosas en comparación a los demás escenarios planteado en (IPCC, 2023).

Por último, se propone un escenario de simulación en el cual se considera la implementación del programa de RD descrito en la Resolución CREG 011 de 2015, como un

evento donde el EIE se desconecta de la red cuando se configura la condición de escasez, que para efectos de este trabajo de investigación se seleccionó el año 2015.

En este escenario se modela el sistema FV del EIE, tomando como base los datos de variables climatológicas empleado en las simulaciones de los escenarios ES1, ES3 al ES8. Posteriormente, se comparan la energía generada por el sistema FV y el consumo energético del EIE en los escenarios propuestos durante el periodo de activación del programa RD. Finalmente, en la Tabla 7 se presenta un resumen de los escenarios de simulación analizados en este trabajo de investigación.

**Tabla 7**

*Listado de escenarios de simulación propuestos.*

Escenario de simulación	Descripción	Parámetro modificado	Valor del parámetro
ES1	Modelo de condiciones actuales	-	-
ES2	Modelo de línea base (MLB)	-	-
ES3	MLB + %Muro-Ventana modificado	% Muro-Ventana	40%
ES4	MLB + %Muro-Ventana modificado	% Muro-Ventana	50%
ES5	MLB + Tubos solares	Inclusión de tubos solares del ES1	-
ES6	MLB + Cubierta verde	Inclusión de cubierta verde del ES1	-
ES7	MLB + Elementos de sombreamiento	Ancho Persiana (Louvre)	0.5 m
ES8	MLB + Elemento de sombreamiento	Ancho Persiana (Louvre)	1.5 m
ES9	ES1 modificado	Variables meteorológicas	Escenario IPCC A2
ES10	Implementación programa RD	Desconexión del EIE en condición de escasez	-

### 4.3 Análisis de resultados de los escenarios de simulación

La Figura 12 presenta los resultados del consumo energético anual del EIE desagregado por componente para los escenarios del modelo de condiciones actuales (ES1) y el modelo de línea base de la edificación, donde se observa un consumo energético aproximado de 160,87 GWh/año y 232,00 GWh/año, respectivamente, lo que representa una reducción cercana al 70%.

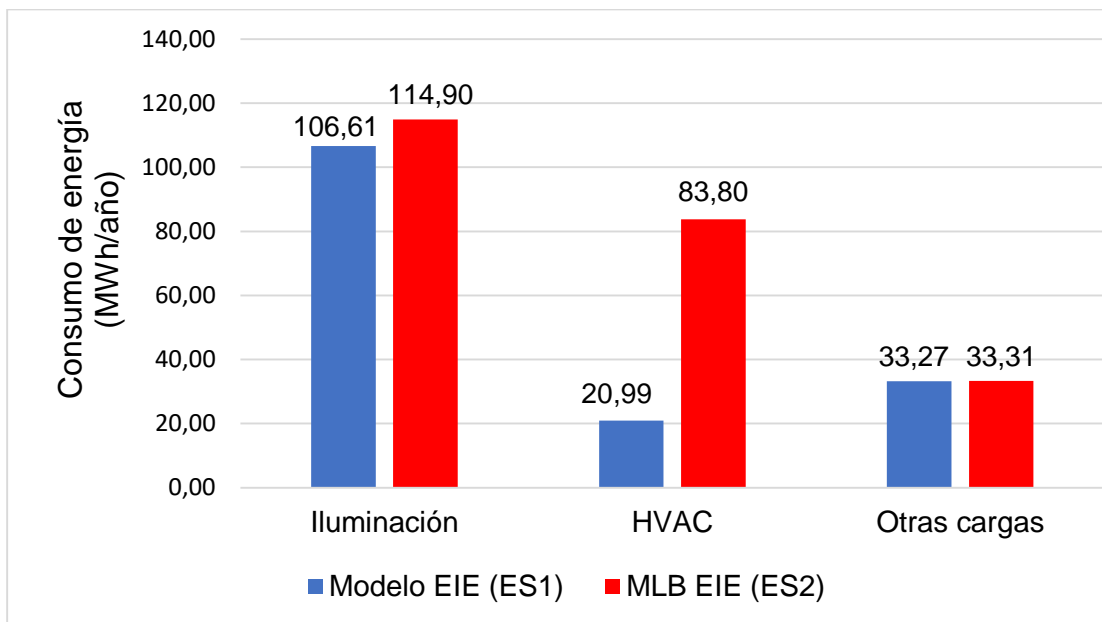
Se evidencia que el consumo energético asociado a los equipos de cómputo y demás cargas misceláneas instaladas en el EIE presentan un comportamiento similar entre los escenarios ES1 y ES2, 33,27 MWh/año y 33,31 MWh/año respectivamente), esto se debe a que la elaboración del MLB no modificó de manera significativa el horario de uso y las cargas de estos equipos. Sin embargo, se observa que la contribución de este componente al consumo de energía incrementa en el modelo de condiciones actuales (20,68%) en comparación al modelo de línea base (14,36%).

En relación al consumo energético por la iluminación artificial del EIE, se observa que el modelo de línea base presenta un valor más alto en comparación al modelo de condiciones actuales, con una diferencia de 8284,19 kWh/año. Ahora bien, la variación de consumo energético más significativa entre los escenarios ES1 y ES2 corresponde al componente de HVAC, siendo para este último escenario una tercera parte del consumo de energía total (aproximadamente un 36,12%).

Además de las métricas de consumo energético, se consideraron las métricas de horas de discomfort y porcentaje estimado de insatisfechos (PPD siglas en ingles). La Tabla 8 presenta los resultados generales para los escenarios de simulación ES1 a ES10.

**Figura 12**

*Consumo energético anual desagregado por componente para los modelos de condiciones actuales (ES1) y línea base (ES2) del EIE.*



**Tabla 8**

*Resultados de métricas para los escenarios de simulación propuestos.*

Escenario de simulación	Consumo Total [MWh/año]	Consumo Iluminación [MWh/año]	Consumo HVAC [MWh/año]	Horas de discomfort	% PPD
ES1	160,87	106,61	20,99	2389,30	24,41
ES2	232,00	114,90	83,80	2373,40	29,74
ES3	227,58	110,57	83,70	2373,14	30,38
ES4	227,09	109,57	84,21	2372,75	30,84
ES5	231,93	114,90	83,73	2373,45	29,67
ES6	232,27	114,82	84,14	2372,96	30,39
ES7	232,37	116,48	82,58	2376,76	29,99
ES8	235,85	120,46	82,08	2380,09	28,72
ES9	159,81	107,05	19,50	2380,24	24,73

Se puede observar que los escenarios donde se modificó la relación Muro-Ventana de la edificación (ES3 y ES4), presentaron una reducción de 3,76% y 4,64% respectivamente en el consumo energético anual asociado al componente de iluminación en comparación al MLB, lo cual se debe principalmente que a una mayor área de ventanas contribuye al aprovechamiento de la luz natural en los espacios de trabajo. Sin embargo, esto ocasiona que incrementen las ganancias térmicas en las ventanas, ocasionando que el consumo de energía del sistema de HVAC aumente ligeramente (aproximadamente 0,5%).

Ahora bien, el uso de elemento de sombreamiento en los ventanales contribuyen a disminuir las ganancias térmicas en el EIE y, por tanto, reducen el consumo energético del sistema de HVAC (1,45% y 2,05% para los escenarios ES7 y ES8, respectivamente), pero incrementa el consumo energético por iluminación debido a que limita el aprovechamiento de la iluminación natural.

Por otra parte, las estrategias de eficiencia energética instaladas en las terrazas del EIE, como las cubiertas verdes (ES6) y los tubos solares (ES5), representan un aporte poco significativo en el consumo energía de los sistemas de iluminación y HVAC.

En relación a las métricas de confort térmico, se evidencia que para todos los escenarios de simulación las horas de discomfort presenta valores similares y muy poca variación entre los escenarios analizados, razón por la cual se decidió descartarla como una métrica para evaluar el subindicador CO. No obstante, la integración de las estrategias de eficiencia energética (ES1) disminuye aproximadamente un 5% el porcentaje PPD en el EIE.

Con respecto a los resultados del escenario ES10, en la Figura 13 se presenta el acumulado total de horas en el cual se cumplió la condición de escasez durante el 2015. Se observa que el

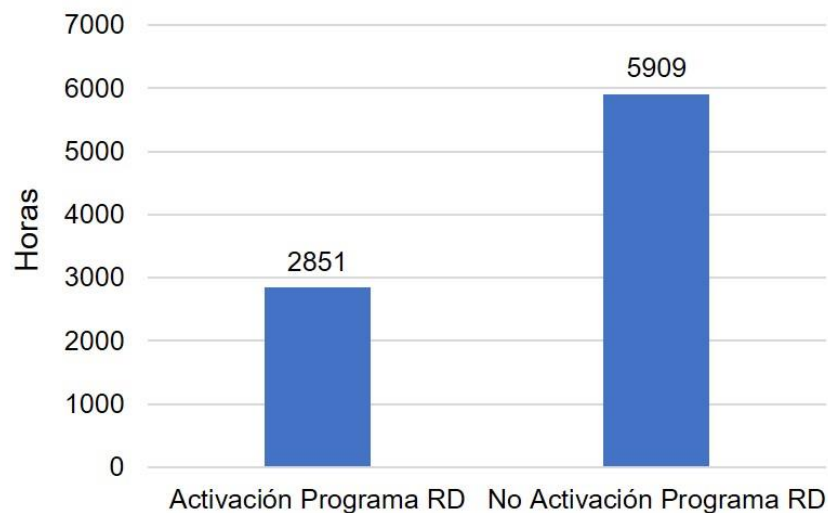
programa de RD se activó en un total de 2851 horas, que representa aproximadamente el 33% del periodo analizado.

De igual manera, en la Figura 14 se presenta la energía generada por el sistema FV y el consumo energético de los escenarios propuestos durante el periodo de activación del programa RD. Se observa que en total la generación FV del EIE es entre cinco y tres veces mayor que la energía demandada por el edificio.

Sin embargo, la generación del sistema FV no es constante durante todo el periodo de activación del programa de RD, dando como resultado que en 1521 horas no se suministró, total o parcialmente, la energía demandada por el EIE. En este sentido, se comparó el consumo energético del EIE para cada escenario de simulación y la energía generada del sistema FV durante las horas donde se activó el programa RD (ver Figura 15), evidenciando que el sistema FV del EIE no suplió entre 13000 kWh y 19500 kWh aproximadamente para los escenarios planteados.

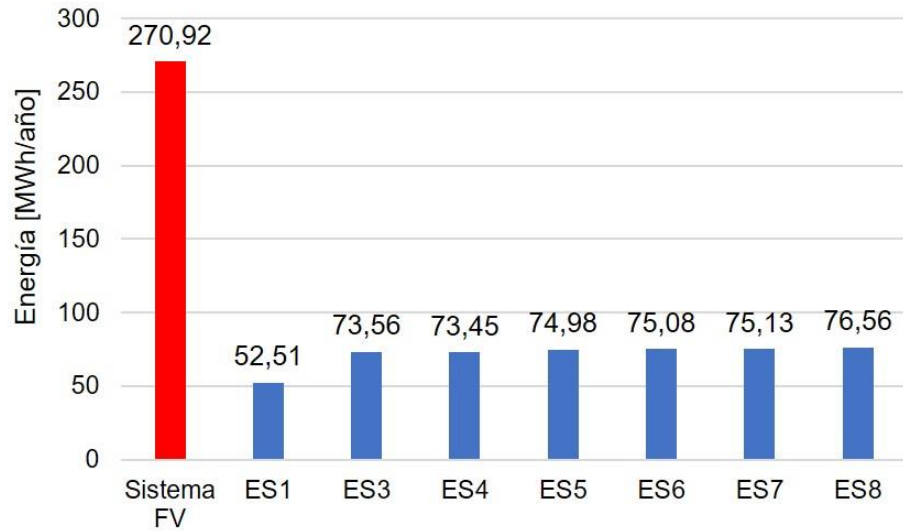
### Figura 13

*Tiempo total de activación del programa de RD durante el año 2015.*



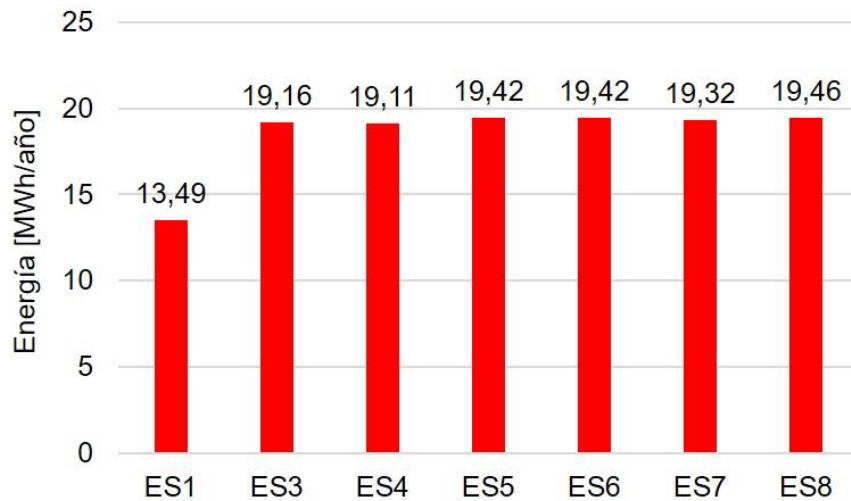
**Figura 14**

*Energía generada por el sistema FV y consumo energético por escenario de simulación durante la activación del programa de RD.*



**Figura 15**

*Consumo energético no suministrado durante la activación del programa de RD.*



## 5. Construcción del indicador compuesto de Desempeño Energético de Edificaciones (DEE)

Esta sección aborda el proceso de construcción para indicadores compuestos, la descripción de los métodos de normalización de datos, métodos agregación y la metodología de ponderación de sub-indicadores, para por último presentar en detalle la formulación del indicador de desempeño energético de edificaciones (DEE).

### 5.1 Proceso de construcción de indicadores compuestos

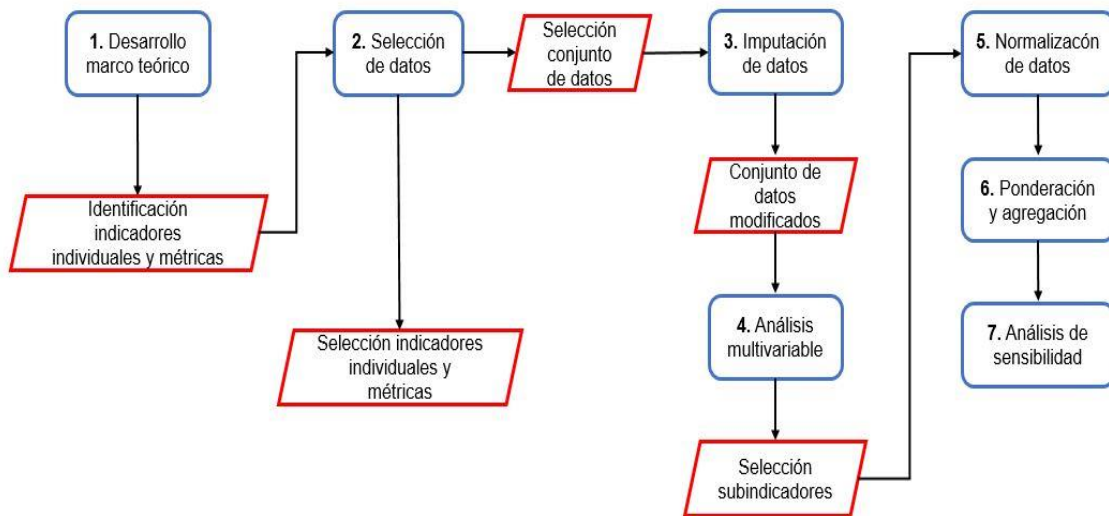
Un indicador compuesto es una herramienta cuantitativa que combina en un único indicador diferentes indicadores individuales o sub-indicadores, los cuales están asociados a fenómenos complejos y multidimensionales, permitiendo realizar un análisis holístico de manera simplificada de estos y facilitando la divulgación de los resultados obtenidos (El Gibari *et al.*, 2021; Gatto & Drago, 2020).

Según la Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo (OECD, siglas en inglés), la construcción de un indicador compuesto se divide en siete etapas (ver Figura 16) (OECD *et al.*, 2008), (i) **desarrollo de marco teórico**, donde se identifican los indicadores y métricas individuales, además se establecen los criterios de selección, (ii) **selección de datos**, en el cual se selecciona el conjunto de datos y se verifica de la calidad de los indicadores y métricas disponibles, (iii) **imputación de datos**, (iv) **análisis multivariable**, para establecer los subindicadores (grupo de indicadores individuales), (v) **normalización de datos**, que permite transformar las métricas y/o subindicadores a una escala común, (vi) **Ponderación y agregación**, donde se establecen los pesos de los subindicadores y método de agregación para estimar el indicador compuesto y

finalmente (vii) **análisis de sensibilidad** para evaluar la calidad y robustez del indicador compuesto.

**Figura 16**

*Metodología para la construcción de indicadores compuestos según la OECD.*



Ahora bien, algunos autores proponen que la construcción de indicadores compuestos se debe realizar en cinco etapas, para lo cual consideran condensar las primeras cuatro etapas planteadas por la OECD en dos etapas, a saber, i) Desarrollo del marco conceptual y ii) Selección de un grupo de indicadores individuales (subindicadores) (Mazziotta & Pareto, 2017).

Por otra parte, autores como (Kaldas *et al.*, 2021; Karagiannis & Karagiannis, 2020) resaltan la importancia de las etapas de normalización de datos, ponderación y agregación de indicadores, por ello es necesario seleccionar los métodos y las estrategias más adecuados según las características de los subindicadores elegidos previamente y dependerá de la experiencia de las personas involucradas en la construcción del indicador compuesto. A continuación, se describen

algunos de los métodos de normalización de datos, ponderación y agregación de indicadores más mencionados en la literatura.

### 5.1.1 Métodos de normalización de datos

Frecuentemente, los indicadores seleccionados para conformar un indicador compuesto son medidos en unidades y escalas diferentes, por lo cual es necesario someter a un proceso de normalización al conjunto de datos, elegidos para evaluar estos indicadores, estableciendo de esta manera una escala común y permitiendo realizar comparaciones adecuadas entre los diferentes indicadores, mitigando el sesgo causado por la variación de unidades y rangos de medición (Kaldas *et al.*, 2021; Karagiannis & Karagiannis, 2020). A continuación, la Tabla 9 presenta algunos de los métodos de normalización más mencionados en la literatura.

**Tabla 9**

*Métodos de normalización de datos más empleados en la literatura.*

Método	Formula	Descripción	Ref.
Estandarización (z-score)	$I_{qc} = \frac{x_{qc} - x_{qc=c}}{\sigma_{qc=c}}$	Convierte el dato a una escala común (adimensional) con media 0 y desviación estándar 1.	(Cabello et al., 2021)
Ranking	$I_{qc} = Rank(x_{qc}^t)$	Técnica simple que no se ve afectada por valores atípicos.	(OECD et al., 2008; Santeramo, 2015)
Min – Max	$I_{qc} = \frac{x_{qc} - \min_c(x_q)}{\max(x_q) - \min_c(x_q)}$	Normaliza el indicador entre un rango de variación, usualmente [0,1].	(El Gibari et al., 2019; Medlol & Alwash, 2020)
Distancia a variable de referencia (DRV)	$I_{qc} = \frac{x_{qc} - x_{qr}}{x_{qr}}$	Mide la posición relativa del dato a una referencia que puede ser una unidad promedio (escala común sin dimensión).	(Karagiannis & Karagiannis, 2020)

Donde,  $I_{qc}$  es el indicador o métrica a normalizar,  $x_{qc}$  es la variable no normalizada y  $\sigma_{qc}$  es la desviación estándar de la variable de referencia.

### 5.1.2 Ponderación de subindicadores

Una adecuada ponderación de los indicadores individuales que componen un indicador compuesto permite obtener una estimación más adecuada y efectiva, además que refleja las prioridades de las partes involucradas en la construcción del indicador propuesto. Lacalle et al., 2020, menciona que existen varios métodos para la asignación de pesos, cada una con sus ventajas y limitaciones, por lo cual la selección depende de las características del indicador compuesto propuesto.

En términos generales, los métodos de ponderación se pueden clasificar en tres grupos, a saber, i) pesos iguales, ii) basados en modelos estadísticos y iii) basados en estrategias de participación (Gan et al., 2017; Lacalle et al., 2020; OECD et al., 2008). La asignación de pesos iguales a cada indicadores individuales es ampliamente mencionada en la literatura y su uso es recomendado en las fases iniciales en la evaluación del indicador compuesto (Floridi et al., 2011; Lacalle et al., 2020) . La Tabla 10 presenta algunos de los métodos de ponderación mencionados en la literatura.

**Tabla 10**

*Clasificación de métodos de ponderación para indicadores* (Becker et al., 2017; El Gibari et al., 2019, 2021; Kaldas et al., 2021; Maricic et al., 2019; Medlol & Alwash, 2020).

Categoría	Método	Descripción
Ponderación igual	Pesos iguales (EW)	Los valores de los pesos son iguales
Modelos estadísticos	Análisis Envolvente de Datos (DEA)	Maximiza la relación entre la suma ponderada de entradas y salidas de cada indicador y utiliza modelos de optimización para calcular los pesos
	Beneficio de la Duda (DoB)	Este método está basado en DEA
	Análisis de Regresión (RA)	Los pesos se asignan estableciendo la relación entre un conjunto de indicadores y una única salida (output)

Categoría	Método	Descripción
Modelos colaborativo	Asignación de Presupuesto (BA)	Asignación de pesos basado en la distribución de un presupuesto (usualmente 100 puntos) por expertos.
	Opinión pública (PO)	Las partes interesadas expresan sus preferencias mediante consulta pública
	Proceso de Jerarquía Analítica (AHP)	Asignación de importancia entre múltiples aspectos (cuantitativos y cualitativos) según el criterio de un grupo de expertos

### 5.1.3 Estrategias de agregación de indicadores

En la literatura se discute ampliamente sobre las estrategias de agregación de indicadores y la clasificación de éstas. Algunos autores hacen referencia a que los métodos de agregación se dividen en tres categorías: lineal, geométrica y métodos no compensatorios (Gan *et al.*, 2017; Lacalle *et al.*, 2020). Sin embargo, algunos de estos métodos se incluyen en el enfoque de análisis de decisiones multicriterio (MCDA siglas en inglés); por lo que, se considera adecuado agrupar las estrategias de agregación en dos enfoques: compensatorio (agregación aditiva y geométrica) y no compensatorio (MCDA) (Greco *et al.*, 2019; OECD *et al.*, 2008).

Los métodos con enfoque compensatorio son comúnmente usados cuando se conoce o asume la independencia de los subindicadores propuestos; además, éstos proveen una forma sencilla de estimar el indicador compuesto e interpretar los resultados obtenidos (Gan *et al.*, 2017; Lacalle *et al.*, 2020; Talukder *et al.*, 2017). Entre las estrategias más empleadas con este enfoque se pueden mencionar la agregación lineal ponderada y geométrica ponderada (esta permite reducir levemente la compensación) (Greco *et al.*, 2019), cuya formulación matemática se presentan en las ecuaciones 2 y 3 respectivamente.

$$IC = \sum_j^N w_j I_j \quad (2)$$

$$IC = \prod_j^N (I_j)^{w_j} \quad (3)$$

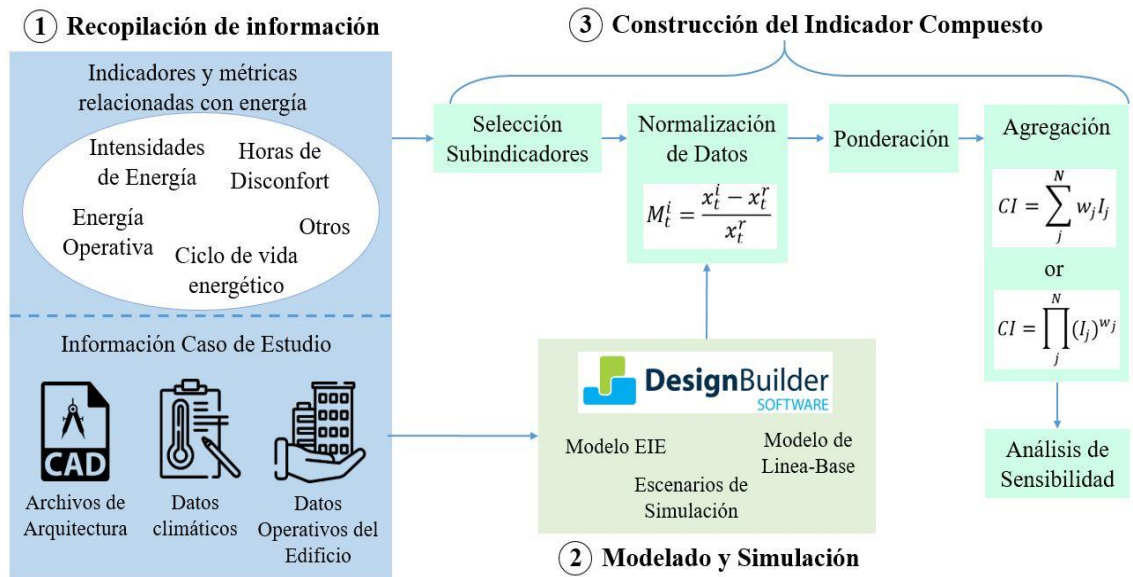
Donde, IC es el indicador compuesto,  $I_j$  es el subindicador normalizado  $j$ , y  $w_j$  es el peso asignado al subindicador  $j$ .

### 5.2 Formulación del indicador de Desempeño Energético de Edificaciones (DEE)

La Figura 17 presenta de manera resumida la metodología implementada en este trabajo de investigación para la construcción del indicador compuesto Desempeño Energético de Edificaciones (DEE).

**Figura 17**

*Metodología de trabajo para la construcción del indicador compuesto DEE.*



Inicialmente, se realizó una revisión de la literatura con el fin establecer el marco conceptual relacionado con el DEE para la construcción del indicador compuesto. Este proceso permitió identificar componentes comunes relacionadas al desempeño de edificios, con un interés particular en los edificios verdes, entre los más mencionados se encuentran la eficiencia energética, confort, adaptabilidad, confiabilidad y sostenibilidad (Filippín *et al.*, 2018; Gatt *et al.*, 2020; Hamburg *et al.*, 2020; Molyneaux *et al.*, 2016).

En este sentido, se eligieron cuatro subindicadores para la evaluación del indicador compuesto DEE, a saber, i) Eficiencia energética (EE), ii) Confort térmico (CO), iii) Adaptabilidad (AD) y iv) Redundancia (RE). Posterior a esto, se definieron las métricas asociadas a cada uno de los subindicadores y la fuente de información para estimarlas.

Ahora bien, las métricas asociadas a los subindicadores RE y AD fueron seleccionadas tomando en cuenta las características particulares del EIE, por lo cual es necesario mencionar algunas consideraciones para estimarlas. El subindicador RE se calcula mediante la métrica de nivel de energía no suministrada, la cual expresa el porcentaje de energía que el sistema fotovoltaico del EIE no suministra durante los periodos de activación del programa RD. La formulación matemática de esta métrica se presenta en la Ecuación 4.

$$N - ENS = \begin{cases} \frac{E_{FV}}{E_{RD}} ; & Si \quad E_{RD} \neq 0 \text{ y } E_{FV} < E_{RD} \\ 1 ; & Si \quad E_{FV} \geq E_{RD} \end{cases} \quad (4)$$

Donde,  $N-ENS$  es la demanda de energía del EIE no atendida durante el periodo de activación del programa RD,  $ERD$  es la energía total demandada por el EIE durante el periodo de

activación del programa RD y EFV es la energía total suministrada por el sistema FV del EIE durante el periodo de activación del programa RD.

En relación al subindicador AD, se planteó la métrica de potencial adaptación energético, que relaciona el porcentaje de energía que la edificación en las condiciones actuales puede suplir ante variaciones climatológicas (ver Ecuación 5).

$$D - E_{AD} = \begin{cases} 1 - \frac{E_{CC} - E_{EIE}}{E_{CC}} ; & Si \ E_{CC} > E_{EIE} \\ 1 ; & Si \ E_{CC} < E_{EIE} \end{cases} \quad (5)$$

Donde,  $D - E_{AD}$  es la métrica potencial adaptación energético;  $E_{EIE}$  es el consumo energético anual del EIE para cada escenario de simulación y  $E_{CC}$  es el valor promedio del consumo energético anual del escenario de cambio de condiciones climáticas (ES9).

La Tabla 11 presenta el listado de los subindicadores seleccionados para la evaluación del indicador compuesto DEE, así como las métricas asignadas a cada uno de estos.

**Tabla 11**

*Selección de subindicadores y métricas del indicador compuesto DEE.*

Subindicador	Definición	Métrica	Fuente de datos
Eficiencia Energética (EE)	Reducción del consumo energético en un sistema (edificaciones para este trabajo), manteniendo las condiciones de operación deseadas (Islam & Hasanuzzaman, 2020)	Consumo energético anual total	Resultado simulación
		Consumo energético anual por iluminación	Resultado simulación
		Consumo energético anual por HVAC	Resultado simulación
Confort térmico (CO)	Nivel de satisfacción percibido sobre las condiciones ambientales térmicas en los edificios (Nicol & Roaf, 2017)	Porcentaje estimado de insatisfechos (PPD)	Resultado simulación
Adaptabilidad (AD)	Capacidad dentro de la edificación para responder a las perturbaciones externas	Potencial adaptación energético	Resultado indirecto simulación

---

	(e.g aumento de las temperaturas) (Molyneaux <i>et al.</i> , 2016)		
Redundancia (RE)	Capacidad de la edificación para suplir la demanda de sus subsistemas ante la ausencia de suministro de energía de la red de distribución	Nivel de energía no suministrada (NENS)	Resultado indirecto simulación

---

Una vez establecidos los subindicadores y métricas, se seleccionó el método de normalización de los datos de entrada para la estimación del indicador. Para efecto de este estudio, se optó por el método de normalización DVR, cuya formulación matemática se presenta en la Ecuación 6.

$$M_t^i = \frac{x_t^i - x_t^r}{x_t^r} = \frac{x_t^i}{x_t^r} - 1 \quad (3)$$

Donde  $M_t^i$  es el valor normalizado de la métrica  $i$  para un tiempo  $t$ ,  $x_t^i$  y  $x_t^r$  son la métrica no normalizada  $i$  y el valor de referencia de la métrica  $i$  (resultado del modelo de línea base). Se asigna el valor cero (0) cuando el valor no normalizado es mayor o igual al valor de referencia.

Es necesario mencionar que el método de normalización no se aplica para aquellas métricas con datos adimensionales y con valores entre 0 y 1, siendo este el caso de las métricas de los subindicadores RE y AD.

En relación a la ponderación de los subindicadores, se optó por el método de pesos iguales dado que este es el más recomendado para las etapas iniciales de la construcción de indicadores compuestos (30; 14). Posteriormente, se procedió a definir la estrategia de agregación ponderada lineal como método más adecuado para la estimación del indicador DEE. Finalmente, las Ecuaciones 7, 8 y 9 presenta en detalle la formulación matemática que describe el indicador DEE.

$$DEE = \varphi(\overline{EE}) + \alpha(\overline{CO}) + \rho(\overline{RE}) + \lambda(\overline{AD}), \quad 0 \leq DEE \leq 1 \quad (7)$$

$$\overline{EE} = \frac{1}{n} \sum_i^n \overline{M_{EE,i}} ; \overline{CO} = \frac{1}{n} \sum_i^n \overline{M_{CO,i}} ; \overline{RE} = \frac{1}{n} \sum_i^n \overline{M_{RE,i}} ; \overline{AD} = \frac{1}{n} \sum_i^n \overline{M_{AD,i}} \quad (8)$$

$$\varphi = \alpha = \rho = \lambda = 0,25 \quad (9)$$

Donde  $\overline{EE}$ ,  $\overline{CO}$ ,  $\overline{RE}$  y  $\overline{AD}$  son los subindicadores normalizados de eficiencia energética, confort térmico, adaptabilidad y redundancia respectivamente.  $\overline{M_{EE,i}}$ ,  $\overline{M_{CO,i}}$ ,  $\overline{M_{RE,i}}$  y  $\overline{M_{AD,i}}$  son las métricas (normalizadas) de cada uno de los subindicadores.

Por último, se propone realizar un análisis de sensibilidad que toma en cuenta algunos métodos de normalización de datos, ponderación y agregación de subindicadores diferentes los planteados anteriormente, con el fin de verificar la idoneidad del indicador compuesto DEE. La Tabla 12 detalla los escenarios seleccionados para realizar el análisis de sensibilidad del indicador DEE.

**Tabla 12**

*Escenarios para el análisis de sensibilidad del indicador compuesto DEE.*

Parámetro	Modificación	Descripción o fórmula
Método de normalización	Estandarización	$I_{qc} = \frac{x_{qc} - x_{qc=c}}{\sigma_{qc=c}}$
Estrategia de agregación	Agregación geométrica	$IC = \prod_j^n (I_j)^{w_j}$
Ponderación	$\varphi = 0,40; \alpha = 0,40; \rho = 0,20$ y $\lambda = 0,10$ (SET1) $\varphi = 0,30; \alpha = 0,30; \rho = 0,20$ y $\lambda = 0,20$ (SET2) $\varphi = 0,50; \alpha = 0,30; \rho = 0,10$ y $\lambda = 0,10$ (SET3) $\varphi = 0,25; \alpha = 0,20; \rho = 0,35$ y $\lambda = 0,20$ (SET4)	Valores asignados por método BA

## 6. Aplicación del indicador compuesto DEE en el EIE

Este capítulo presenta los resultados de la aplicación del indicador compuesto DEE, el análisis de la incidencia de las aplicaciones URE y programa RD en el desempeño energético del EIE, y los resultados del análisis de sensibilidad para verificar la idoneidad del indicador DEE.

### 6.1 Resultados del indicador DEE y estimación de impactos de las EEE en el EIE

La Tabla 13 presenta la estimación de los subindicadores seleccionados para los escenarios de simulación propuestos, implementando los métodos de normalización de datos DVR y ponderación igual de los subindicadores (0,25). Se puede observar que, en términos generales, el sistema FV del EIE permite suministrar aproximadamente el 50% del consumo energético durante el periodo de activación del programa de RD, lo cual significa un mejoramiento del nivel de redundancia de la edificación ante escenarios de ausencia del suministro de energía de la red.

**Tabla 13**

*Resultados de los subindicadores aplicando el método de normalización de datos DVR.*

Escenario	EE	CO	RE	AD
ES1	0,1983	0,2390	0,5007	1,00
ES3	0,0083	0,0060	0,4932	0,9897
ES4	0,0100	0,0080	0,4932	0,9904
ES5	0,0013	0,0030	0,4929	0,9904
ES6	0,0003	0,0040	0,4929	0,9931
ES7	0,0083	0,0260	0,4930	0,9911
ES8	0,0103	0,0490	0,4928	0,9931

Es importante mencionar que los resultados del subindicador AD son relativamente altos, cercanos al valor máximo posible, lo que permite inferir que la integración de las EEE mejora la

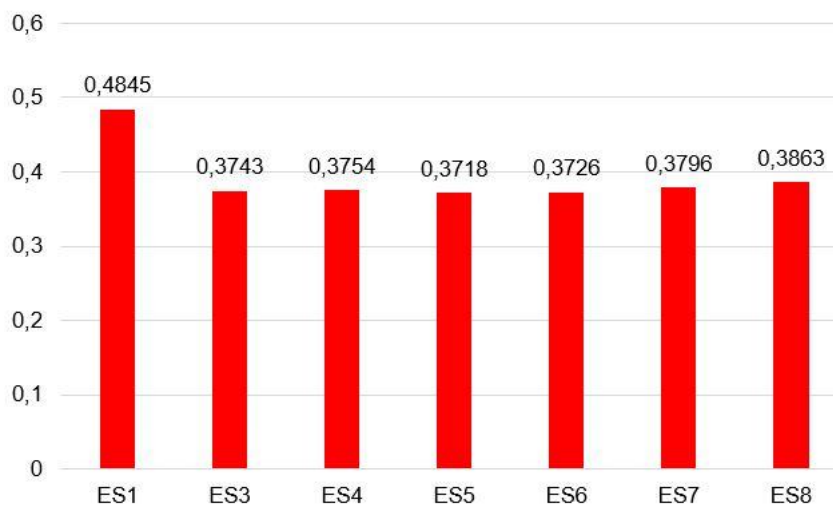
adaptabilidad del EIE ante variaciones de las condiciones climáticas, en especial al incremento de la temperatura media del entorno de la edificación.

En relación a los subindicadores EE y CO, se evidencia que la integración de tubos solares y cubiertas verdes (ES5 y ES6), no presentan un impacto significativo en estos, lo cual se debe a que estas EEE interactúan exclusivamente con algunas áreas específicas del EIE.

La Figura 18 presenta los resultados del indicador DEE para los escenarios de simulación propuestos, empleando el método de agregación lineal ponderada y una ponderación igual para cada subindicador (0,25). Se observa que la incidencia individual de las EEE en el desempeño energético del EIE presenta un comportamiento similar y con poca variación (1,5% aproximadamente), teniendo como resultado la mejoría entre un 37% y 38%, siendo el uso de elementos de sombreado (escenarios ES7 y ES8), el de mayor impacto en el DEE de la edificación.

**Figura 18**

*Resultados de la aplicación del indicador compuesto DEE en el EIE.*



Ahora bien, se evidencia que la integración conjunta de las EEE contribuye a mejorar el desempeño energético del EIE aproximadamente un 48% (ES1), siendo un 10% mayor al valor DEE estimado de manera individual para cada EEE de la edificación.

## 6.2 Verificación de idoneidad del indicador DEE

La Tabla 14 presenta los resultados de los subindicadores calculados con el método Z-score, los cuales son necesarios para realizar el análisis de sensibilidad planteado en la sección 5.2. Se observa que los resultados para los escenarios ES3 al ES8 de los subindicadores EE y CO presentan poca variación (diferencia entre 0 y 0,03 aproximadamente) en relación al método de normalización DVR.

No obstante, el escenario ES1 presenta una mayor diferencia entre los dos métodos de normalización para los subindicadores EE y CO (0,067 y 0,122 respectivamente), esto se debe principalmente a que los resultados del modelo de línea base (ES2), que es usado para la normalización de las métricas, tienen una desviación estándar pequeña y por consiguiente el método Z-score estima valores mayores.

**Tabla 14**

*Resultados de los subindicadores aplicando el método de normalización de datos Z-score.*

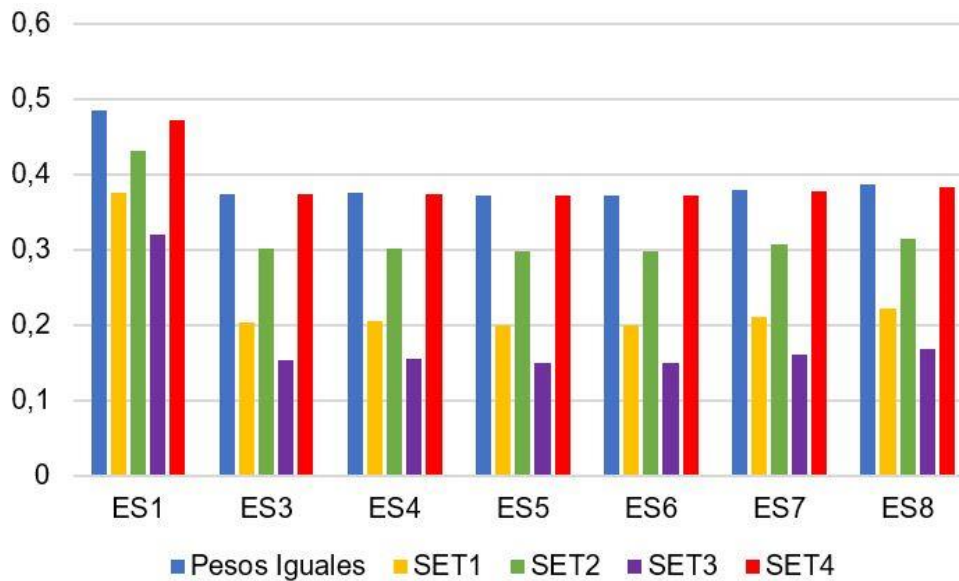
Escenario	EE	CO	RE	AD
ES1	0,2653	0,3610	0,5007	1,00
ES3	0,017	0,0060	0,4932	0,9897
ES4	0,020	0,0070	0,4932	0,9904
ES5	0,0003	0,0040	0,4929	0,9904

ES6	0,0007	0,0040	0,4929	0,9931
ES7	0,0057	0,0390	0,4930	0,9911
ES8	0,0067	0,0820	0,4928	0,9931

A continuación, en las figuras 19 a 22 se presentan los resultados del indicador DEE estimados con aplicación de los métodos de normalización DVR y Z-score, las estrategias de agregación lineal ponderada y geométrica para los sets de pesos planteados en la Tabla 12.

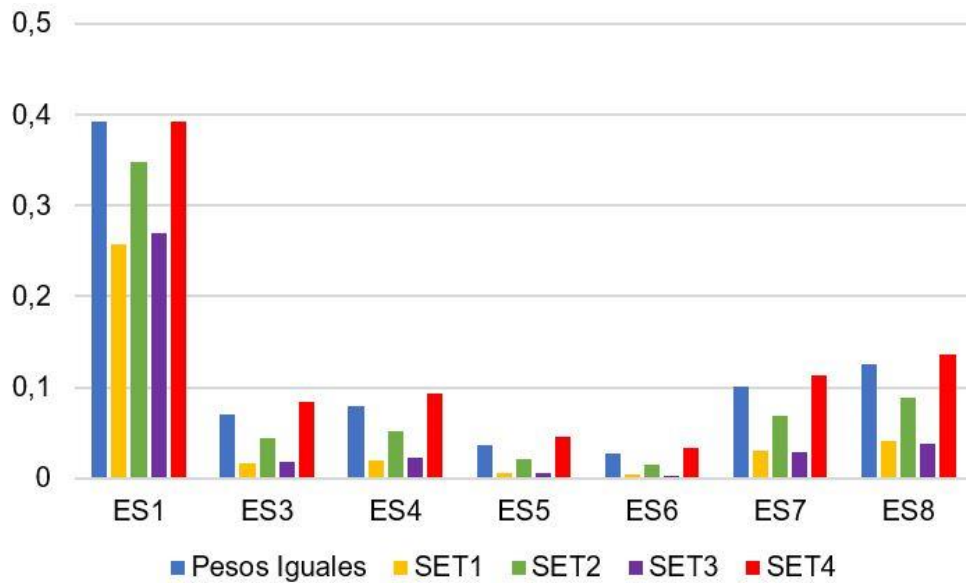
**Figura 19**

*Resultados del indicador compuesto DEE evaluados con los métodos de normalización DRV y agregación lineal ponderada.*



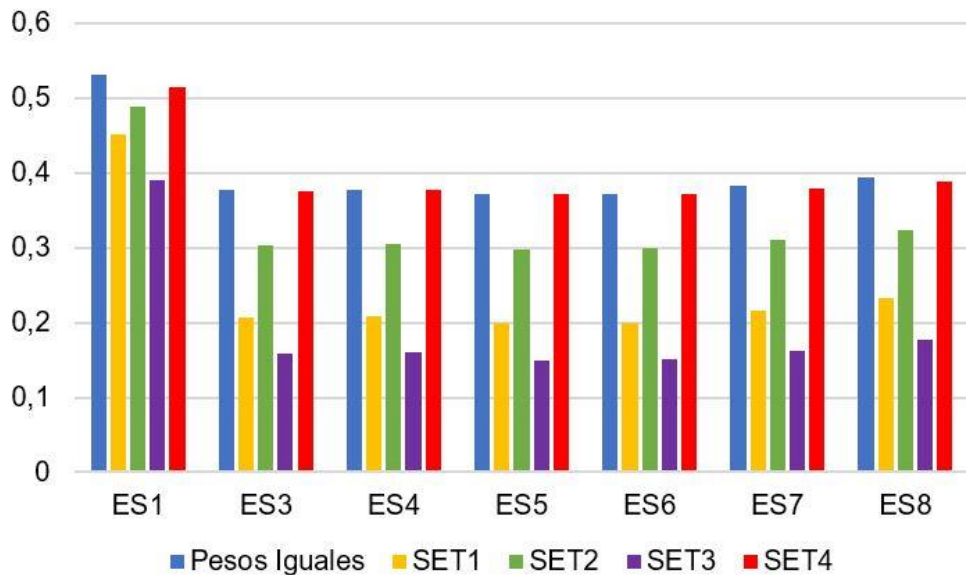
**Figura 20**

*Resultados del indicador compuesto DEE evaluados con los métodos de normalización DRV y agregación geométrica.*



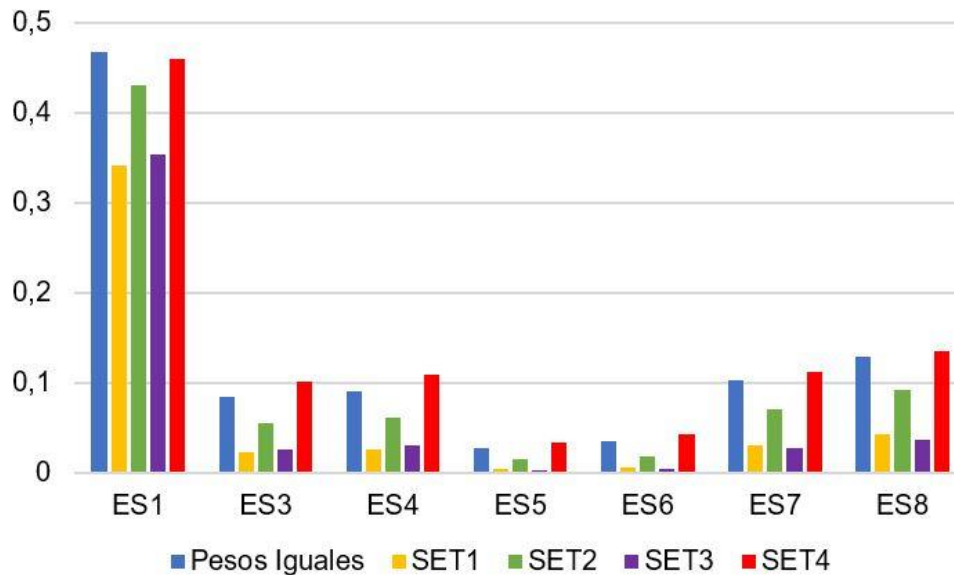
**Figura 21**

*Resultados del indicador compuesto DEE evaluados con los métodos de normalización Z-score y agregación lineal ponderada.*



**Figura 22**

*Resultados del indicador compuesto DEE evaluados con los métodos de normalización Z-score y agregación lineal ponderada.*



De las Figuras 19 y 21, en las cuales se muestran la agregación ponderada de los sub-indicadores para diferentes sets de pesos, se evidencia que los métodos de normalización de datos no afectan significativamente la estimación del indicador *DEE* (diferencias entre 0,001 y 0,080), además los resultados observados tienen un comportamiento similar para cada escenario de simulación evaluado.

De igual manera, un comportamiento similar se observa cuando se cambió el método de agregación lineal ponderada por método de agregación geométrica ponderada (ver Figuras 20 y 22). No obstante, las diferencias entre los resultados obtenidos mediante la aplicación del método de agregación geométrica ponderada son ligeramente mayores, entre 0,002 y 0,100.

Por otra parte, Se observa que la asignación de los pesos presenta una incidencia consistente en el indicador *DEE*, teniendo resultados similares entre el caso de pesos iguales y el

set 4 (diferencias entre 0,004 y 0,014). De igual forma, se evidencia que el máximo valor del indicador DEE se presentan cuando los pesos de los sub-indicadores EE y AD son cercanos al valor de 0,25.

Asimismo, el método de agregación geométrica ponderada disminuye los valores estimados del indicador compuesto, especialmente para los escenarios donde se integran individualmente las estrategias de eficiencia energética (ES3 a ES8), ya que este método es de naturaleza no compensatoria y afecta aquellos sub-indicadores con valores cercanos a cero (0).

Por otra parte, los valores del indicador DEE estimados con el método Z-score son aproximadamente un 10% mayores a los calculados con el método DVR para el EIE en condiciones actuales (escenario ES1). Sin embargo, los resultados obtenidos para los demás escenarios de simulación, incluidos los escenarios del análisis de sensibilidad, no presenta diferencias significativas (valores entre 0,004 y 0,02), al tiempo que se observa un comportamiento similar y consistente en cada uno de estos, lo que permite validar la idoneidad para evaluar el desempeño energético del EIE.

En este sentido, se puede afirmar que el indicador compuesto DEE es una herramienta adecuado para analizar el desempeño energético de un edificio universitaria de una forma simplificada y holística, además de estimar los impactos asociados a la integración de estrategias de eficiencia energética en la edificación. Por último, es necesario mencionar que el análisis presentado en este trabajo de investigación se realizó para estado estacionario, por lo cual no fueron tomados en cuenta escenarios disruptivos como desastres naturales.

## 7. Conclusiones

Este trabajo de investigación aborda el problema de analizar el desempeño energético de edificaciones con fines educativos y cómo la integración de estrategias de eficiencia energética incide en éste. Para tal fin, se seleccionó el EIE de la UIS como caso de estudio y la herramienta computacional DesignBuilder V6 para la elaboración de las etapas de modelado y simulación energética del edificio. DesignBuilder permitió elaborar de manera detallada los modelos energéticos del EIE, en los cuales se especificaron la información operativa de las diferentes áreas y arquitectura del edificio, así como las condiciones climáticas de su entorno.

Cabe resaltar que se simplificaron algunos detalles arquitectónicos y el modelado de los tubos solares del EIE (DesignBuilder no cuenta con un aplicativo para simular este tipo de tecnología), esto con el fin de mejorar el costo computacional asociado a las simulaciones, sin que esto llegue a afectar el resultado de los modelos energéticos del EIE y obteniendo una aproximación cercana a las condiciones reales de la edificación. De igual manera, durante la asignación de los materiales para los elementos arquitectónicos del EIE, como ventanas, muros, puertas, pisos, entre otros, se evidenció una carencia de estudios o normas enfocadas en la caracterización de los materiales empleados en el sector de la construcción en Colombia.

En relación al proceso de simulación de los modelos energéticos del EIE, se corroboró que DesignBuilder entrega un archivo de resultados de forma detallada y necesaria para estimar las métricas de cada subindicador seleccionado. Sin embargo, fue necesario simular la generación del sistema FV de la edificación de manera independiente, esto debido que esto minimiza el tiempo de simulación y la cantidad de datos que arrojan los resultados, permitiendo que puedan ser visualizados con DesignBuilder.

Se verificó que la integración de las estrategias de eficiencia energética del EIE contribuyen considerablemente en la reducción del consumo energético (70% aproximadamente), debido principalmente al diseño que aprovecha la ventilación natural y un menor uso de sistemas HVAC.

Posteriormente, se propuso la construcción del indicador compuesto DEE para evaluar la incidencia e impactos de las estrategias de eficiencia energética en el desempeño energético del EIE, aplicando un enfoque holístico y simplificado que integra conceptos multidimensionales comúnmente asociados al funcionamiento de la edificación. Este indicador se conforma por cuatro subindicadores, a saber, Eficiencia Energética (EE), Confort Térmico (CO), Redundancia (RE) y Adaptabilidad (AD), los cuales se calculan mediante la estrategia de agregación lineal ponderada con ponderaciones iguales para cada uno de estos.

Se evaluó el indicador DEE para los escenarios de condiciones actuales (ES1) y aquellos que incluyen de manera individual las estrategias de eficiencia energética (ES3 al ES8), y se pudo comprobar que las estrategias de ahorro energético contribuyeron a mejorar el desempeño energético del EIE en aproximadamente un 48%, tomando como referencia el método de agregación lineal ponderada y asignando pesos iguales a los subindicadores evaluados.

Asimismo, el indicador DEE fue verificado mediante un análisis de sensibilidad que contempla diferentes métodos de normalización de datos, estrategias de agregación y valores de ponderación para cada subindicador. Se observaron variaciones consistentes entre los resultados obtenidos para cada escenario planteado, lo que permite concluir que el indicador compuesto DEE reproduce de manera adecuada el comportamiento energético del EIE.

Por otra parte, es necesario mencionar que el diseño del EIE contribuye a que la edificación se adapte adecuadamente a posibles variaciones de las condiciones climáticas del entorno, lo que se evidencia en los altos valores obtenidos para el subindicador AD en cada uno de los escenarios

de simulación propuestos. Mientras que la redundancia del EIE es afectada directamente por la integración de sistemas de respaldo y generación de energía que suplan el consumo energético del edificio durante la activación del programa RD (Resolución CREG 011 de 2015), siendo aproximadamente un 50% debido a la integración del sistema FV.

No obstante, algunas estrategias de eficiencia energética como los tubos solares y las cubiertas verdes tuvieron poco impacto en el desempeño energético del EIE, por lo que se considera necesario que se evalúe el indicador DEE de manera local en las áreas donde estas estrategias son integradas.

Finalmente, se puede concluir que el enfoque de la construcción de un indicador compuesto para analizar el desempeño energético de edificaciones aporta una perspectiva holística sobre la operación y funcionamiento de estas estructuras para unas condiciones específicas. De igual manera, la relativa simplicidad para implementar y evaluar el indicador DEE permite su aplicación a otros tipos de edificios (*e.g.*, residenciales, comerciales o industriales), facilitando de esta manera la caracterización energética y al ahorro de energía de edificaciones en Colombia.

Se espera que la apropiación, implementación y adaptación del indicador compuesto DEE sea una herramienta útil para la toma de decisiones en procesos de diseño, construcción y remodelación de edificaciones, además de favorecer la integración de criterios de sostenibilidad y estrategias de eficiencia energética en el sector de la construcción en Colombia. Sin embargo, es necesario realizar un proceso riguroso para establecer nuevos pesos o indicadores, en caso de que se quiera adaptar el indicador DEE, ya que esta es una de las principales desventajas del enfoque de indicadores compuestos y depende en gran medida del consenso de los expertos involucrados en la construcción del indicador.

## **8. Recomendaciones y trabajo futuro**

Se recomienda realizar una búsqueda exhaustiva de las especificaciones térmicas y energéticas de los materiales constitutivos de las edificaciones que se desean modelar, ya que no se dispone de una caracterización de estos en Colombia.

En relación al proceso de construcción del indicador compuesto, se recomienda realizar un análisis riguroso para la asignación de la ponderación y la selección de la estrategia de agregación, en el caso que se adapte a otro tipo de edificaciones que no fue abordado en este trabajo de investigación.

Como trabajo futuro se espera extender y adaptar el indicador compuesto propuesto en este trabajo de investigación para abordar el concepto de resiliencia energética relacionado al funcionamiento de edificaciones. Asimismo, se planea incluir dentro de la evaluación del indicador subindicadores que estimen los impactos económicos y ambientales (*e.g.*, emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)).

Por otra parte, también se considera de utilidad abordar el enfoque de optimización para la selección y evaluación de los subindicadores durante la fase de construcción del indicador compuesto, lo que permitiría mejorar la calidad de éste.

### Referencias Bibliográficas

- Aalami, H. A., Pashaei-Didani, H., & Nojavan, S. (2019). Deriving nonlinear models for incentive-based demand response programs. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 106, 223–231. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.10.003>
- Adarme, H., Jaimes, A., & Roballo, H. (2014). *Aplicabilidad de tecnologías en iluminación para una vivienda de interes social tipo*. Universidad Industrial de Santander.
- Akkose, G., Meral Akgul, C., & Dino, I. G. (2021). Educational building retrofit under climate change and urban heat island effect. *Journal of Building Engineering*, 40, 102294. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2021.102294>
- Al Dakheel, J., Del Pero, C., Aste, N., & Leonforte, F. (2020). Smart buildings features and key performance indicators: A review. *Sustainable Cities and Society*, 61, 102328. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102328>
- Anaya, G., Avellaneda, C., & Cárdenas, J. (2013). *Influencia de parámetros de diseño de aplicaciones sostenibles sobre el consumo energético en las instalaciones del quinto piso del edificio de ingeniería eléctrica a partir de simulaciones con designbuilder DESIGNBUILDER*. Universidad Industrial de Santander.
- Becker, W., Saisana, M., Paruolo, P., & Vandecasteele, I. (2017). Weights and importance in composite indicators: Closing the gap. *Ecological Indicators*, 80, 12–22. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.03.056>
- Belussi, L., Barozzi, B., Bellazzi, A., Danza, L., Devitofrancesco, A., Fanciulli, C., Ghellere, M., Guazzi, G., Meroni, I., Salamone, F., Scamoni, F., & Scrosati, C. (2019). A review of performance of zero energy buildings and energy efficiency solutions. *Journal of Building*

- Engineering*, 25, 100772. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100772>
- Bharath, B., Sami, A., & Rastogi, K. (2021). Analysis of a Structure for Efficient Energy Utilization Using Design Builder. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1017(1), 12016. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1017/1/012016>
- Bouyer, J., Inard, C., & Musy, M. (2011). Microclimatic coupling as a solution to improve building energy simulation in an urban context. *Energy and Buildings*, 43(7), 1549–1559. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.02.010>
- Burgass, M. J., Halpern, B. S., Nicholson, E., & Milner-Gulland, E. J. (2017). Navigating uncertainty in environmental composite indicators. *Ecological Indicators*, 75, 268–278. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.12.034>
- Cabello, J. M., Ruiz, F., & Pérez-Gladish, B. (2021). An Alternative Aggregation Process for Composite Indexes: An Application to the Heritage Foundation Economic Freedom Index. *Social Indicators Research*, 153(2), 443–467. <https://doi.org/10.1007/s11205-020-02511-8>
- Cárdenas-Rangel, J. (2017). *Herramienta metodologica para el analisis eficiente de simulaciones energeticas de edificaciones en el tropico*. Universidad Industrial de Santander.
- Cárdenas-Rangel, J., Jaramillo-Ibarra, J., & Osma-Pinto, G. (2022). Estimation of the impact of energy efficiency measures recommended by Colombian legislation on the performance of low-and middle-income housing buildings. *Journal of Building Engineering*, 52, 104402. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104402>
- Castañeda-Hernández, R. L. (2018). *Estrategias para la Inclusión de la Respuesta de la Demanda en Mercados de Energía Eléctrica Similares al Colombiano* [Universidad de La Salle]. [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_electrica/184/](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_electrica/184/)
- Ceballos-Fuentealba, I., Álvarez-Miranda, E., Torres-Fuchslocher, C., del Campo-Hitschfeld, M.

- L., & Díaz-Guerrero, J. (2019). A simulation and optimisation methodology for choosing energy efficiency measures in non-residential buildings. *Applied Energy*, 256, 113953. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113953>
- Charoen, P., Kitbutrawat, N., & Kudtongngam, J. (2021). A Demand Response Implementation with Building Energy Management System. *Energies*, 15(3), 1220. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/en15031220>
- Cho, H. M., Park, J. H., Wi, S., Chang, S. J., Yun, G. Y., & Kim, S. (2019). Energy retrofit analysis of cross-laminated timber residential buildings in Seoul, Korea: Insights from a case study of packages. *Energy and Buildings*, 202, 109329. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.07.046>
- Chow, D. H. C. (2022). *Indoor Environmental Quality: Thermal Comfort*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90386-8.00006-1>
- Corbett, J., Wardle, K., & Chen, C. (2018). Toward a sustainable modern electricity grid: The effects of smart metering and program investments on demand-side management performance in the US electricity sector 2009-2012. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 65(2), 252–263. <https://doi.org/10.1109/TEM.2017.2785315>
- Cuerda, E., Guerra-Santin, O., Sendra, J. J., & Neila, F. J. (2020). Understanding the performance gap in energy retrofitting: Measured input data for adjusting building simulation models. *Energy and Buildings*, 209, 109688. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109688>
- D'Oca, S., Hong, T., & Langevin, J. (2018). The human dimensions of energy use in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 731–742. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.019>
- Del Ama Gonzalo, F., Moreno Santamaría, B., & Montero Burgos, M. J. (2023). Assessment of building energy simulation tools to predict heating and cooling energy consumption at early

- design stages. *Sustainability*, 15(3), 1920. [https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su15031920](https://doi.org/10.3390/su15031920)
- DesignBuilder Software Ltd. (n.d.). *Welcome To DesignBuilder V6*.  
[https://designbuilder.co.uk/helpv6.0/#Advanced\\_Calculation\\_Options.htm](https://designbuilder.co.uk/helpv6.0/#Advanced_Calculation_Options.htm)
- DNP, & Enersinc. (2017). *Energy Demand Situation in Colombia*.
- Dočekalová, M. P., & Kocmanová, A. (2016). Composite indicator for measuring corporate sustainability. *Ecological Indicators*, 61, 612–623.  
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.10.012](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.10.012)
- Dolge, K., Kubule, A., & Blumberga, D. (2020). Composite index for energy efficiency evaluation of industrial sector: sub-sectoral comparison. *Environmental and Sustainability Indicators*, 8, 100062. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indic.2020.100062](https://doi.org/10.1016/j.indic.2020.100062)
- Dominguez-Gil, C., Segovia-Gonzalez, M. M., & Contreras, I. (2021). A multiplicative composite indicator to evaluate educational systems in OECD countries. *Compare: A Journal of Comparative and International Education*, 0(0), 1–18.  
<https://doi.org/10.1080/03057925.2020.1865791>
- Dongmei, S. (2018). Research and Application of Energy Consumption Benchmarking Method for Public Buildings Based on Actual Energy Consumption. *Energy Procedia*, 152, 475–483.  
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.09.256](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.09.256)
- Durdyev, S., Zavadskas, E. K., Thurnell, D., Banaitis, A., & Ihtiyar, A. (2018). Sustainable Construction Industry in Cambodia: Awareness, Drivers and Barriers. *Sustainability*, 10(2), 392. <https://doi.org/10.3390/su10020392>
- Economidou, M., Todeschi, V., Bertoldi, P., D'Agostino, D., Zangheri, P., & Castellazzi, L. (2020). Review of 50 years of EU energy efficiency policies for buildings. *Energy and Buildings*, 225, 110322. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110322>

- El Gibari, S., Cabello, J. M., Gómez, T., & Ruiz, F. (2021). Composite Indicators as Decision Making Tools: The Joint Use of Compensatory and Noncompensatory Schemes. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 20(03), 847–879. <https://doi.org/https://doi.org/10.1142/S0219622021500231>
- El Gibari, S., Gómez, T., & Ruiz, F. (2018). Evaluating university performance using reference point based composite indicators. *Journal of Informetrics*, 12(4), 1235–1250. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2018.10.003>
- El Gibari, S., Gómez, T., & Ruiz, F. (2019). Building composite indicators using multicriteria methods: a review. *Journal of Business Economics*, 89(1), 1–24. <https://doi.org/10.1007/s11573-018-0902-z>
- Elamin, W. E., & Shaaban, M. F. (2019). New real-time demand-side management approach for energy management systems. *IET Smart Grid*, 2(2), 183–191. <https://doi.org/https://doi.org/10.1049/iet-stg.2018.0033>
- Elnabawi, M. H. (2020). Building Information Modeling-Based Building Energy Modeling: Investigation of Interoperability and Simulation Results. *Frontiers in Built Environment*, 6. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2020.573971>
- Fan, C., Xiao, F., Li, Z., & Wang, J. (2018). Unsupervised data analytics in mining big building operational data for energy efficiency enhancement: A review. *Energy and Buildings*, 159, 296–308. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.008>
- Feofilovs, M., & Romagnoli, F. (2017). Measuring Community Disaster Resilience in the Latvian Context: An Apply Case Using a Composite Indicator Approach. *Energy Procedia*, 113, 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.04.012>
- Filippín, C., Flores Larsen, S., & Ricard, F. (2018). Improvement of energy performance metrics

- for the retrofit of the built environment. Adaptation to climate change and mitigation of energy poverty. *Energy and Buildings*, 165, 399–415. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.12.050>
- Floridi, M., Pagni, S., Falorni, S., & Luzzati, T. (2011). An exercise in composite indicators construction: Assessing the sustainability of Italian regions. *Ecological Economics*, 70(8), 1440–1447. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2011.03.003>
- Gan, X., Fernandez, I. C., Guo, J., Wilson, M., Zhao, Y., Zhou, B., & Wu, J. (2017). When to use what: Methods for weighting and aggregating sustainability indicators. *Ecological Indicators*, 81, 491–502. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.05.068>
- García-Sepúlveda, I. A. (2016). *Recopilación sobre políticas legales y reglamentarias para la construcción sostenible en Colombia*. Universidad de La Salle.
- Gatt, D., Yousif, C., Cellura, M., Camilleri, L., & Guarino, F. (2020). Assessment of building energy modelling studies to meet the requirements of the new Energy Performance of Buildings Directive. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 127, 109886. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109886>
- Gatto, A., & Drago, C. (2020). Measuring and modeling energy resilience. *Ecological Economics*, 172, 106527. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.106527>
- Geraldi, M. S., & Ghisi, E. (2020). Building-level and stock-level in contrast: A literature review of the energy performance of buildings during the operational stage. *Energy and Buildings*, 211, 109810. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109810>
- Giambona, F., & Vassallo, E. (2014). Composite indicator of social inclusion for European countries. *Social Indicators Research*, 116(1), 269–293. <https://doi.org/10.1007/s11205-013-0274-2>

- Giorgi, S., Lavagna, M., Wang, K., Osmani, M., Liu, G., & Campioli, A. (2022). Drivers and barriers towards circular economy in the building sector: Stakeholder interviews and analysis of five European countries policies and practices. *Journal of Cleaner Production*, 336, 130395. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130395>
- Gomes, M. G., Rodrigues, A. M., & Natividade, F. (2021). Thermal and energy performance of medical offices of a heritage hospital building. *Journal of Building Engineering*, 40, 102349. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102349>
- González-Torres, M., Pérez-Lombard, L., Coronel, J. F., Maestre, I. R., & Yan, D. (2022). A review on buildings energy information: Trends, end-uses, fuels and drivers. *Energy Reports*, 8, 626–637. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.11.280>
- Greco, S., Ishizaka, A., Tasiou, M., & Torrisi, G. (2019). On the Methodological Framework of Composite Indices: A Review of the Issues of Weighting, Aggregation, and Robustness. *Social Indicators Research*, 141(1), 61–94. <https://doi.org/10.1007/s11205-017-1832-9>
- Gu, J., Guo, F., Peng, X., & Wang, B. (2023). Green and Sustainable Construction Industry: A Systematic Literature Review of the Contractor's Green Construction Capability. *Buildings*, 13(2), 470. <https://doi.org/10.3390/buildings13020470>
- Hamburg, A., Kuusk, K., Mikola, A., & Kalamees, T. (2020). Realisation of energy performance targets of an old apartment building renovated to nZEB. *Energy*, 194, 116874. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116874>
- He, L., & Chen, L. (2021). The incentive effects of different government subsidy policies on green buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110123. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110123>
- Hewitt, E., Oberg, A., Coronado, C., & Andrews, C. (2019). Assessing “green” and “resilient”

- building features using a purposeful systems approach. *Sustainable Cities and Society*, 48, 101546. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101546>
- Hoffmann, P., Kremer, M., & Zaharia, S. (2020). Financial integration in Europe through the lens of composite indicators. *Economics Letters*, 194, 109344. <https://doi.org/10.1016/j.econlet.2020.109344>
- Hong, T., Langevin, J., & Sun, K. (2018). Building simulation: Ten challenges. *Building Simulation*, 11(5), 871–898. <https://doi.org/10.1007/s12273-018-0444-x>
- Hwang, B.-G., Shan, M., & Lye, J.-M. (2018). Adoption of sustainable construction for small contractors: major barriers and best solutions. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 20(10), 2223–2237. <https://doi.org/10.1007/s10098-018-1598-z>
- Iddrisu, I., & Bhattacharyya, S. C. (2015). Sustainable Energy Development Index: A multi-dimensional indicator for measuring sustainable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 513–530. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.032>
- IEA. (2023). *Tracking Clean Energy Progress 2023*. <https://www.iea.org/reports/tracking-clean-energy-progress-2023>
- IPCC. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report*. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Islam, M. M., & Hasanuzzaman, M. (2020). *Chapter 1 - Introduction to energy and sustainable development* (M. D. Hasanuzzaman & N. A. Rahim (eds.); pp. 1–18). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814645-3.00001-8>
- Jamoussi, B., Abu-Rizaiza, A., & AL-Haij, A. (2022). Sustainable Building Standards, Codes and Certification Systems: The Status Quo and Future Directions in Saudi Arabia. *Sustainability*, 14(16), 10314. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su141610314>

- Jiménez-Pulido, C., Jiménez-Rivero, A., & García-Navarro, J. (2022). Improved sustainability certification systems to respond to building renovation challenges based on a literature review. *Journal of Building Engineering*, 45, 103575. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103575>
- Kaldas, O., Shihata, L. A., & Kiefer, J. (2021). An index-based sustainability assessment framework for manufacturing organizations. *Procedia CIRP*, 97, 235–240. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.231>
- Karagiannis, R., & Karagiannis, G. (2020). Constructing composite indicators with Shannon entropy: The case of Human Development Index. *Socio-Economic Planning Sciences*, 70, 100701.
- Karimi, H., & Jadid, S. (2020). Optimal energy management for multi-microgrid considering demand response programs: A stochastic multi-objective framework. *Energy*, 195, 116992. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.116992>
- Kelly, J. A., Clinch, J. P., Kelleher, L., & Shahab, S. (2020). Enabling a just transition: A composite indicator for assessing home-heating energy-poverty risk and the impact of environmental policy measures. *Energy Policy*, 146, 111791. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111791>
- Kubwimana, B., & Najafi, H. (2023). A Novel Approach for Optimizing Building Energy Models Using Machine Learning Algorithms. *Energies*, 16(3), 1033. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/en16031033>
- Lacalle, I., Belsa, A., Vaño, R., & Palau, C. E. (2020). Framework and Methodology for Establishing Port-City Policies Based on Real-Time Composite Indicators and IoT: A Practical Use-Case. *Sensors*, 20(15), 4131. <https://doi.org/10.3390/s20154131>

- Leiringer, R. (2020). Sustainable Construction through Industry Self-Regulation: The Development and Role of Building Environmental Assessment Methods in Achieving Green Building. *Sustainability*, 12(21), 8853. <https://doi.org/10.3390/su12218853>
- Li, G., Kou, C., & Wang, H. (2019). Estimating city-level energy consumption of residential buildings: A life-cycle dynamic simulation model. *Journal of Environmental Management*, 240, 451–462. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.130>
- Li, Q., Long, R., Chen, H., Chen, F., & Wang, J. (2020). Visualized analysis of global green buildings: Development, barriers and future directions. *Journal of Cleaner Production*, 245, 118775. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118775>
- Li, Y., O'Donnell, J., García-Castro, R., & Vega-Sánchez, S. (2017). Identifying stakeholders and key performance indicators for district and building energy performance analysis. *Energy and Buildings*, 155, 1–15. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.003>
- Mahiwal, S. G., Bhoi, M. K., & Bhatt, N. (2021). Evaluation of energy use intensity (EUI) and energy cost of commercial building in India using BIM technology. *Asian Journal of Civil Engineering*, 1–18. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s42107-021-00352-5>
- Mancini, F., Lo Basso, G., & de Santoli, L. (2019). Energy Use in Residential Buildings: Impact of Building Automation Control Systems on Energy Performance and Flexibility. *Energies*, 12(15), 2896. <https://doi.org/https://www.mdpi.com/1996-1073/12/15/2896>
- Mariano-Hernández, D., Hernández-Callejo, L., Zorita-Lamadrid, A., Duque-Pérez, O., & Santos-García, F. (2021). A review of strategies for building energy management system: Model predictive control, demand side management, optimization, and fault detect & diagnosis. *Journal of Building Engineering*, 33, 101692. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101692>

- Maricic, M., Egea, J. A., & Jeremic, V. (2019). A Hybrid Enhanced Scatter Search–Composite I-Distance Indicator (eSS-CIDI) Optimization Approach for Determining Weights Within Composite Indicators. *Social Indicators Research*, 144(2), 497–537. <https://doi.org/10.1007/s11205-018-02056-x>
- Mathew, P., Sanchez, L., Lee, S. H., & Walter, T. (2021). Assessing the Energy Resilience of Office Buildings: Development and Testing of a Simplified Metric for Real Estate Stakeholders. *Buildings*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/buildings11030096>
- Mazziotta, M., & Pareto, A. (2017). *Synthesis of Indicators: The Composite Indicators Approach* (F. Maggino (ed.); pp. 159–191). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-60595-1\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-60595-1_7)
- Medlol, S. G., & Alwash, A. A. A. (2020). Economic, Social, and Environmental Sustainable Operation of Roadways within the Central Business District (CBD) sector at Hilla City Incorporated with Public Transport. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 928, 22100. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/928/2/022100>
- Millán-Martínez, M., Osma-Pinto, G., & Jaramillo-Ibarra, J. (2022). Estimating a Building's Energy Performance using a Composite Indicator: A Case Study. *TecnoLógicas*, 25(54), e2352--e2352. <https://doi.org/10.22430/22565337.2352>
- MinAmbiente. (2024). *Construcción Sostenible*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/construccion-sostenible/>
- MinMinas. (2022). *Plan de Acción Indicativo PROURE 2022-2030*.
- MinVivienda. (2015). *Anexo 1. Guía de construcción sostenible para el ahorro de agua y energía en edificaciones*.

- Moazami, A., Carlucci, S., Nik, V. M., & Geving, S. (2019). Towards climate robust buildings: An innovative method for designing buildings with robust energy performance under climate change. *Energy and Buildings*, 202, 109378. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109378>
- Molyneaux, L., Brown, C., Wagner, L., & Foster, J. (2016). Measuring resilience in energy systems: Insights from a range of disciplines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 1068–1079. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.063>
- Mutani, G., Todeschi, V., & Beltramino, S. (2020). Energy Consumption Models at Urban Scale to Measure Energy Resilience. *Sustainability*, 12(14), 5678. <https://doi.org/10.3390/su12145678>
- Nicol, J. F., & Roaf, S. (2017). Rethinking thermal comfort. *Building Research & Information*, 45(7), 711–716. <https://doi.org/10.1080/09613218.2017.1301698>
- OECD, Union, E., & Commission, J. R. C.-E. (2008). *Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide*. <https://doi.org/https://doi.org/https://doi.org/10.1787/9789264043466-en>
- Osma-Pinto, G., & Ordóñez-Plata, G. (2019). Measuring factors influencing performance of rooftop PV panels in warm tropical climates. *Solar Energy*, 185, 112–123. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.04.053>
- Osma, G., Amado, L., Villamizar, R., & Ordoñez, G. (2015). Building Automation Systems as Tool to Improve the Resilience from Energy Behavior Approach. *Procedia Engineering*, 118, 861–868. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.524>
- Pina, A., Silva, C., & Ferrão, P. (2012). The impact of demand side management strategies in the penetration of renewable electricity. *Energy*, 41(1), 128–137. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.06.013>

- Puttamadappa, C., & Parameshachari, B. . (2019). Demand side management of small scale loads in a smart grid using glow-worm swarm optimization technique. *Microprocessors and Microsystems*, 71, 102886. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.micpro.2019.102886>
- Qiang, G., Tang, S., Hao, J., Di Sarno, L., Wu, G., & Ren, S. (2023). Building automation systems for energy and comfort management in green buildings: A critical review and future directions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 179, 113301. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113301>
- Quirapas-Franco, M. A. J., Pawar, P., & Wu, X. (2021). Green building policies in cities: A comparative assessment and analysis. *Energy and Buildings*, 231, 110561. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110561>
- Reuter, M., Patel, M. K., Eichhammer, W., Lapillonne, B., & Pollier, K. (2020). A comprehensive indicator set for measuring multiple benefits of energy efficiency. *Energy Policy*, 139, 111284. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111284>
- Rotger-Griful, S., Welling, U., & Jacobsen, R. H. (2017). Implementation of a building energy management system for residential demand response. *Microprocessors and Microsystems*, 55, 100–110. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.micpro.2017.10.006>
- Saha, S., Hiremath, R. B., Prasad, S., & Kumar, B. (2021). Barriers to Adoption of Commercial Green Buildings in India: A Review. *Journal of Infrastructure Development*, 13(2), 107–128. <https://doi.org/10.1177/09749306211058499>
- Saka, N., Olanipekun, A. O., & Omotayo, T. (2021). Reward and compensation incentives for enhancing green building construction. *Environmental and Sustainability Indicators*, 11, 100138. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2021.100138>
- Santeramo, F. G. (2015). On the Composite Indicators for Food Security: Decisions Matter! *Food*

- Reviews International*, 31(1), 63–73. <https://doi.org/10.1080/87559129.2014.961076>
- Shadram, F., & Mukkavaara, J. (2019). Exploring the effects of several energy efficiency measures on the embodied/operational energy trade-off: A case study of swedish residential buildings. *Energy and Buildings*, 183, 283–296. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.11.026>
- Shams, S., & Rahman, M. M. (2017). Green Building. In P. Mondal & A. K. Dalai (Eds.), *Sustainable Utilization of Natural Resources* (1st Editio, pp. 539–566). CRC Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781315153292>
- Shiel, P., Tarantino, S., & Fischer, M. (2018). Parametric analysis of design stage building energy performance simulation models. *Energy and Buildings*, 172, 78–93. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.04.045>
- Siksnyte-Butkiene, I., Streimikiene, D., Lekavicius, V., & Balezentis, T. (2021). Energy poverty indicators: A systematic literature review and comprehensive analysis of integrity. *Sustainable Cities and Society*, 67, 102756. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102756>
- Talukder, B., W. Hipel, K., & W. vanLoon, G. (2017). Developing Composite Indicators for Agricultural Sustainability Assessment: Effect of Normalization and Aggregation Techniques. *Resources*, 6(4). <https://doi.org/10.3390/resources6040066>
- Teng, J., Wang, P., Mu, X., & Wang, W. (2021). Energy-saving performance analysis of green technology implications for decision-makers of multi-story buildings. *Environment, Development and Sustainability*, 1–27. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10668-021-01304-4>
- Tronchin, L., Manfren, M., & Nastasi, B. (2018). Energy efficiency, demand side management and energy storage technologies – A critical analysis of possible paths of integration in the

- built environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 95, 341–353.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.060>
- U.S. Department of Energy. (2024). *Demand Response*.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2024). *Green Building*.  
<https://archive.epa.gov/greenbuilding/web/html/about.html>
- United Nations Environment Programme. (2022). *2022 Global Status Report for Buildings and Construction - Beyond foundations: Toward a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector*. United Nations Environment Programme.  
<https://wedocs.unep.org/20.500.11822/45095>
- Vahid-Ghavidel, M., Javadi, M. S., Gough, M., Santos, S. F., Shafie-khah, M., & Catalão, J. P. S. (2020). Demand Response Programs in Multi-Energy Systems: A Review. *Energies*, 13(17), 4332. <https://doi.org/10.3390/en13174332>
- Van Thillo, L., Verbeke, S., & Audenaert, A. (2022). The potential of building automation and control systems to lower the energy demand in residential buildings: A review of their performance and influencing parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 112099. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112099>
- Vargas Tobón, L., Gutiérrez Gómez, A., Velásquez Ceballos, H., & García Rendón, J. J. (2019). Redes inteligentes y mecanismo de respuesta de la demanda: el caso del sector eléctrico colombiano. *Economía Del Caribe*, 23, 5.  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8111584>
- Wei, G., Yu, X., Fang, L., Wang, Q., Tanaka, T., Amano, K., & Yang, X. (2022). A review and comparison of the indoor air quality requirements in selected building standards and certifications. *Building and Environment*, 226, 109709.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109709>

Zhang, D., & Yong, T. (2021). Green building, pro-environmental behavior and well-being: Evidence from Singapore. *Cities*, 108, 102980.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.102980>

Zhu, L., Wang, B., & Sun, Y. (2020). Multi-objective optimization for energy consumption, daylighting and thermal comfort performance of rural tourism buildings in north China. *Building and Environment*, 176(March), 106841.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106841>

## Apéndices

### Apéndice A. Descripción de los componentes constructivos y operativos del EIE

A continuación, se presenta de manera detallada la información empleada para configurar el modelo virtual del EIE.

**Tabla A.1**

*Ganancias térmicas de equipos de cómputo por espacios de trabajo del EIE.*

Piso	Zona	Computador de escritorio	Portátiles	Potencia computadores [W]	Ganancias computadores [W/m <sup>2</sup> ]
Sótano	Puestos de trabajo	0	15	1500	15,7
Piso 1	Centro de estudios	3	0	600	13
	Salade trabajo grupal	0	20	2000	20,9
	Sala de trabajo individual	0	60	6000	49
	Sala IEEE	4	2	1000	26,2
Piso 5	Coordinación pregrado	2	0	400	17
	Oficinas modulares	9	0	1800	8,9
	Dirección E3t	1	0	200	9,9
	CCTV	2	1	500	60,4

**Tabla A.2**

*Ganancias térmicas de equipos ofimáticos por espacios de trabajo del EIE.*

Piso	Zona	Impresora	Escáner	Potencia ofimáticos [W]	Ganancia ofimáticos [W/m <sup>2</sup> ]
Piso 3	Sala IEEE	1	0	370	9,7
Piso 5	Coordinación de pregrado	2	1	890	37,7
	Oficinas modulares	5	1	2000	9,8
	Dirección E3T	1	1	520	25,7

**Tabla A.3**

*Capacidad del sistema de aire acondicionado del EIE.*

Piso	Espacio	Capacidad [kW]
Sótano	Puestos de trabajo	42,204
Piso 4	Aula 401	42,204
	Aula 404	42,204
	Aula 405	42,204
	Aula 406	42,204
Piso 5	CCTV	2,637
	Sala de reuniones	7,034
	Dirección E3T	3,517

**Tabla A.4**

*Ganancias térmicas por misceláneos del Edificio de Ingeniería Eléctrica.*

Piso	Zona	Proyector	Televisor LED	Smart Board	Potencia misceláneos [W]	Ganancia misceláneas [W/m <sup>2</sup> ]
Sótano	Baño M	0	0	0	5	2,2
	Baño H	0	0	0	5	2,3
	Áreas comunes	0	0	0	5	0,1
	Puestos de trabajo	0	0	0	5	0,1
	Cafetería	0	0	0	5	1,3
	Planta	0	0	0	5	0,1
	Subestación	0	0	0	5	0,1
	Piso 1	Baños H	0	0	0	5
Baños M		0	0	0	5	0,3
Corredor baños		0	0	0	5	0,1
Centro de estudios		0	0	0	5	0,1
Sala de trabajo grupal		0	0	0	5	0,1
Sala de trabajo individual		0	0	0	5	0,0
Aula 1		0	0	0	5	0,1
Corredor Sala Individual		0	0	0	5	0,1
Hall principal		0	0	0	5	0,1
Cuarto técnico 1		0	0	0	5	1,8
Piso 2	Aula 202	1	0	0	225	4,3

ESTIMACIÓN DE IMPACTOS DEBIDO A LA INTEGRACIÓN DE APLICACIONES URE Y PROGRAMA DE RESPUESTA DE LA DEMANDA EN UNA EDIFICACIÓN UNIVERSITARIA A PARTIR DE SIMULACIONES

91

Piso	Zona	Proyector	Televisor LED	Smart Board	Potencia misceláneos [W]	Ganancia misceláneas [W/m <sup>2</sup> ]
	Aula 201	1	0	0	225	3,4
	Baños H	0	0	0	5	0,2
	Baños M	0	0	0	5	0,3
	Cuarto técnico 2	0	0	0	5	0,6
	Aula 207	1	0	0	225	2,9
	Aula 206	1	0	0	225	5,7
	Aula 205	1	0	0	225	5,6
	Aula 204	1	0	0	225	3,4
	Corredor 2	0	0	0	5	0,0
	Cuarto de aseo	0	0	0	5	1,7
	Aula 302	1	0	0	225	4,3
	Aula 301	1	0	0	225	3,4
	IEEE	0	0	0	5	0,1
	Aula 305	1	0	0	225	2,9
Piso 3	Aula 304	1	0	0	225	2,1
	Corredor 3	0	0	0	5	0,0
	Cuarto técnico 3	0	0	0	5	0,6
	Baño M	0	0	0	5	0,3
	Baño H	0	0	0	5	0,2
	Cuarto de aseo	0	0	0	5	1,1
	Aula 402	0	0	0	5	0,1
	Aula 401	1	0	1	235	3,7
	Aula 406	1	0	1	235	3,0
	Aula 405	1	0	1	235	2,9
	Aula 404	1	0	1	235	3,7
Piso 4	Cuarto Técnico 4	0	0	0	5	0,7
	Baños H	0	0	0	5	0,2
	Baños M	0	0	0	5	0,3
	Cuarto de aseo	0	0	0	5	1,3
	Corredor 4 Oeste	0	0	0	5	0,2
	Corredor 4 Este	0	0	0	5	0,0
	Coordinación de pregrado	0	0	0	5	0,2
	Cuarto técnico 5	0	0	0	5	0,5
	Corredor posgrado	0	0	0	5	0,4
	Corredor acceso	0	0	0	5	0,1
Piso 5	Sala de reuniones	0	0	0	5	0,2
	Oficinas modulares	0	0	0	5	0,0
	Dirección E3t	0	0	0	5	0,2
	Baño dirección	0	0	0	5	1,3
	Aseo	0	0	0	5	2,3
	Baños H	0	0	0	5	1,5

Piso	Zona	Proyector	Televisor LED	Smart Board	Potencia misceláneos [W]	Ganancia misceláneas [W/m <sup>2</sup> ]
	Baños M	0	0	0	5	2,3
	Cafetería	0	0	0	5	1,9
	CCTV	0	1	0	100	12,1

**Tabla A.5**

*Densidad de ocupación por área del EIE.*

Piso	Zona	Área [m <sup>2</sup> ]	Ocupación [Personas]	Densidad de personas [Personas/m <sup>2</sup> ]
	Baño M	2,29	1	0,4
	Baño H	2,19	1	0,5
	Áreas comunes	38,7	3	0,1
Sótano	Puestos de trabajo	95,41	15	0,2
	Cafetería	3,77	1	0,3
	Planta	35,76	0	0,0
	Subestación	38	0	0,0
	Baños H	24,3	7	0,3
	Baños M	16,93	3	0,2
	Corredor baños	45,12	10	0,2
	Centro de estudios	46,39	12	0,3
Piso 1	Sala de trabajo grupal	95,73	70	0,7
	Sala de trabajo individual	122,4	65	0,5
	Aula 1	53,9	42	0,8
	Corredor Sala Individual	36	50	1,4
	Hall principal	77,6	25	0,3
	Cuarto técnico 1	2,8	1	0,4
	Aula 202	52,85	35	0,7
	Aula 201	66,704	35	0,5
	Baños H	24,201	3	0,1
	Baños M	16,96	7	0,4
	Cuarto técnico 2	7,88	1	0,1
Piso 2	Aula 207	76,3	54	0,7
	Aula 206	39,47	32	0,8
	Aula 205	40,18	32	0,8
	Aula 204	66,64	35	0,5
	Corredor 2	161,3	223	1,4
	Cuarto de aseo	2,91	1	0,3
Piso 3	Aula 302	52,85	35	0,7

Piso	Zona	Área [m <sup>2</sup> ]	Ocupación [Personas]	Densidad de personas [Personas/m <sup>2</sup> ]
	Aula 301	66,7	35	0,5
	IEEE	38,21	10	0,3
	Aula 305	77,68	55	0,7
	Aula 304	106,83	70	0,7
	Corredor 3	161,2	195	1,2
	Cuarto técnico 3	7,88	1	0,1
	Baño M	16,96	3	0,2
	Baño H	24,201	7	0,3
	Cuarto de aseo	4,42	1	0,2
	Aula 402	53,2	35	0,7
	Aula 401	63,98	33	0,5
	Aula 406	78,65	35	0,4
	Aula 405	79,82	35	0,4
	Aula 404	63,4	35	0,6
Piso 4	Cuarto Técnico 4	7,13	1	0,1
	Baños H	24,35	7	0,3
	Baños M	16,96	3	0,2
	Cuarto de aseo	3,8	1	0,3
	Corredor 4 Oeste	24,602	68	2,8
	Corredor 4 Este	135,12	105	0,8
	Coordinación de pregrado	23,58	2	0,1
	Cuarto técnico 5	10,52	1	0,1
	Corredor posgrado	13,3	1	0,1
	Corredor acceso	93,8	3	0,0
	Sala de reuniones	21,9	10	0,5
	Oficinas modulares	203,21	11	0,1
Piso 5	Dirección E3t	20,27	1	0,0
	Baño dirección	3,92	1	0,3
	Aseo	2,18	1	0,5
	Baños H	3,31	1	0,3
	Baños M	2,17	1	0,5
	Cafetería	2,66	1	0,4
	CCTV	8,28	1	0,1

**Tabla A.6**

*Ganancias de iluminación por espacios de trabajo del EIE.*

Piso	Zona	Potencia iluminación [W]	Tipo de luminaria	Ganancia iluminación [W/m <sup>2</sup> ]
Sótano	Baño M	26	Superficial	11,4
	Baño H	26	Superficial	11,9
	Áreas comunes	296	Superficial	7,6
	Puestos de trabajo	1064	Empotrada	11,2
	Cafetería	64	Superficial	17,0
	Planta	112	Superficial	3,1
	Subestación	224	Superficial	5,9
Piso 1	Baños H	112	Superficial	4,6
	Baños M	112	Superficial	6,6
	Corredor baños	112	Superficial	2,5
	Centro de estudios	336	Superficial	7,2
	Sala de trabajo grupal	840	Superficial	8,8
	Sala de trabajo individual	1120	Empotrada	9,2
	Aula 1	504	Suspendida	9,4
	Corredor Sala Individual	168	Suspendida	4,7
	Hall principal	336	Suspendida	4,3
	Cuarto técnico 1	64	Suspendida	22,9
Piso 2	Aula 202	616	Suspendida	11,7
	Aula 201	616	Suspendida	9,2
	Baños H	128	Suspendida	5,3
	Baños M	128	Suspendida	7,5
	Cuarto técnico 2	56	Suspendida	7,1
	Aula 207	728	Suspendida	9,5
	Aula 206	392	Suspendida	9,9
	Aula 205	392	Suspendida	9,8
	Aula 204	560	Suspendida	8,4
	Corredor 2	672	Suspendida	4,2
	Cuarto de aseo	26	Suspendida	8,9
	Aula 302	808	Suspendida	15,3
	Aula 301	808	Suspendida	12,1
Piso 3	IEEE	408	Suspendida	10,7
	Aula 305	816	Suspendida	10,5
	Aula 304	1020	Suspendida	9,5
	Corredor 3	640	Suspendida	4,0
	Cuarto técnico 3	64	Suspendida	8,1
	Baño M	128	Suspendida	7,5
	Baño H	128	Suspendida	5,3
	Cuarto de aseo	26	Suspendida	5,9
Piso 4	Aula 402	408	Suspendida	7,7
	Aula 401	816	Empotrada	12,8
	Aula 406	944	Empotrada	12,0

Piso	Zona	Potencia iluminación [W]	Tipo de luminaria	Ganancia iluminación [W/m <sup>2</sup> ]
	Aula 405	944	Empotrada	11,8
	Aula 404	944	Empotrada	14,9
	Cuarto Técnico 4	64	Suspendida	9,0
	Baños H	128	Suspendida	5,3
	Baños M	128	Suspendida	7,5
	Cuarto de aseo	26	Suspendida	6,8
	Corredor 4 Oeste	128	Suspendida	5,2
	Corredor 4 Este	512	Suspendida	3,8
	Coordinación de pregrado	272	Empotrada	11,5
	Cuarto técnico 5	64	Suspendida	6,1
	Corredor posgrado	56	Suspendida	4,2
	Corredor acceso	304	Suspendida	3,2
	Sala de reuniones	272	Empotrada	12,4
	Oficinas modulares	1890	Empotrada	9,3
Piso 5	Dirección E3t	272	Empotrada	13,4
	Baño dirección	26	Empotrada	6,6
	Aseo	26	Suspendida	11,9
	Baños H	26	Empotrada	7,9
	Baños M	26	Empotrada	12,0
	Cafetería	26	Empotrada	9,8
	CCTV	64	Empotrada	7,7

**Tabla A.7**

*Listado de materiales de los elementos constructivos del EIE.*

Elemento	Materiales	Espesor [m]
Muros externos e internos en ladrillo	Mortero	0,025
	Ladrillo H10	0,1
	Mortero	0,025
Cubiertas	Sustrato	0,12
	Geotextil	0,01
	Polietileno de alta densidad	0,1
	Impermeabilizante	0,02
	Geotextil	0,01
	Concreto externo	0,05

ESTIMACIÓN DE IMPACTOS DEBIDO A LA INTEGRACIÓN DE APLICACIONES URE Y  
PROGRAMA DE RESPUESTA DE LA DEMANDA EN UNA EDIFICACIÓN  
UNIVERSITARIA A PARTIR DE SIMULACIONES 96

	Placa aligerada en concreto	0,4
	Capa de aire	0,3
	Fibra mineral	0,01
Placas entrepiso	Placa aligerada en concreto	0,4
	Concreto externo	0,05
Muros internos y externos en Drywall	Drywall	0,01
	Aire	0,13
	Drywall	0,01