

Determinación de Parámetros de Diseño Orientada a la Disminución del Consumo Energético en
Edificaciones Residenciales de Clima Cálido Tropical

Yeferson David Barón Fernández y Danilo Ernesto Niño Torres

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Electricista

Director

Jorge Luis Cárdenas Rangel

Magíster en Ingeniería Eléctrica

Codirector

German Alfonso Osma Pinto

Dr. Ingeniería Eléctrica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

Queremos dedicar este trabajo de grado a nuestros padres, familiares, amigos y compañeros quienes en el transcurso de este tiempo han contribuido en nuestro proceso académico y personal, del mismo modo al director Jorge Luis Cárdenas Rangel por su tiempo, enseñanza y consejo que han sido enriquecedores en nuestro proceso educativo.

Agradecimientos

Agradecemos a nuestros padres quienes a lo largo de este camino nos han brindado su apoyo incondicional frente a las adversidades que se nos han presentado, a nuestro director y codirector los cuales nos dedicaron de su tiempo para poder ejecutar los objetivos propuestos en el trabajo de grado, finalmente a la Universidad Industrial de Santander junto con la escuela E3t que nos proporcionaron espacios formativos, docentes y las herramientas necesarias para obtener datos y simulaciones de un edificio residencial en clima cálido tropical.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Objetivos	15
1.1 Objetivo general	15
1.2 Objetivos específicos	15
2. Marco Teórico.....	16
2.1 Consumo energético de las edificaciones residenciales.....	16
2.2 Normatividad energética.....	17
2.2.1 Resolución 0549 de 2015.....	18
2.2.2 CONPES 3919	18
2.2.3 PAI PROURE 2022-2030.....	18
2.2.4 Plan de desarrollo nacional	19
2.3 Modelado energético de edificaciones.....	19
2.3.1 Proceso de modelado energético.....	19
2.3.1.1 Recopilación de datos.	20
2.3.1.2 Modelado geométrico.	20
2.3.1.3 Asignación de datos.....	20
2.3.1.4 Ajuste del modelo.	20
2.3.2 Herramientas y software de simulación energética	21
2.3.2.1 EnergyPlus.....	21
2.3.2.2 eQuest.	21

2.3.2.3 DesignBuilder.	21
2.3.2.4 IES VE.	22
2.3.2.5 DOE-2.	22
2.4 Parámetros con influencia en el desempeño energético de edificaciones residenciales.....	22
2.4.1 Parámetros eléctricos	23
2.4.1.1 Eficiencias de los electrodomésticos.	23
2.4.1.2 Eficiencia de los sistemas de iluminación.	23
2.4.1.3 Eficiencia de los sistemas HVAC.	24
2.4.1.4 Energía renovable.	24
2.4.2 Parámetros arquitectónicos	24
2.4.2.1 Diseño arquitectónico.	24
2.4.2.2 Materiales de construcción.	25
2.4.2.3 Orientación del edificio.....	25
2.4.2.4 Aislamiento térmico.....	25
2.4.2.5 Sombreado solar.....	25
2.4.3 Parámetros ambientales	25
2.4.3.1 Temperatura exterior.....	26
2.4.3.2 Radiación solar.....	26
2.4.3.3 Ventilación natural.....	26
2.4.3.4 Humedad.	26
2.4.4 Régimen de uso u ocupación	26
2.5 Análisis de sensibilidad y optimización.....	27
2.5.1 Métodos de análisis de sensibilidad.....	27

2.5.1.1 Análisis de sensibilidad local.....	27
2.5.1.2 Análisis de sensibilidad global.....	27
2.5.1.2.1 Método de Sobol.....	27
2.5.1.2.2 Método de Morris.....	28
2.5.1.2.3 Simulación de Monte Carlo.....	28
2.5.1.2.4 Método de regresión lineal múltiple (MLR).....	28
2.5.2 Optimización.....	28
3. Desarrollo de la solución.....	29
3.1 Revisión bibliográfica.....	29
3.2 Clima con enfoque a Bucaramanga.....	35
3.3 Modelado energético del apartamento.....	36
3.3.1 Especificaciones del edificio.....	36
3.3.2 Obtención del modelo geométrico.....	37
3.3.3 Llenado de datos.....	39
3.3.3.1 Actividad y equipos.....	39
3.3.3.2 Cerramientos y aberturas.....	40
3.3.3.3 Iluminación y HVAC.....	41
3.3.4 Ajuste del modelo.....	42
3.4 Selección de parámetros.....	44
3.5 Simulación paramétrica.....	45
3.6 Análisis de correlación Python.....	49
4. Conclusiones.....	55
5. Recomendaciones.....	57

Referencias Bibliográficas 58

Apéndices..... 67

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Palabras claves y Ecuaciones de búsqueda.....	29
Tabla 2. Artículos sobre el análisis del impacto de parámetros en edificaciones.....	30
Tabla 3. Parámetros analizados.....	34
Tabla 4. Datos climáticos en Bucaramanga.....	36
Tabla 5. Resumen elementos	37
Tabla 6. Equipos por apartamento o zona.....	40
Tabla 7. Especificaciones de las ventanas	41
Tabla 8. Equipos por apartamento o zona (iluminación).....	41
Tabla 9. Promedios por mes para 48 meses de consumo de energía eléctrica en (kW/h)	42
Tabla 10. Consumo energético de 12 meses en (kW/h) y el error%.....	43
Tabla 11. Consumo de energía eléctrica simulado para 12 meses en (kW/h)	44
Tabla 12. Parámetros seleccionados de los documentos y configuración en DesignBuilder	45
Tabla 13. Comparativa del consumo de energía simulado actual y con HVAC (kW/h).....	46
Tabla 14. Comparativa configuración actual y configuración obtenida con HVAC en (kW/h)..	48
Tabla 15. Comparativa de consumo de energía respecto a la variación de los parámetros	49
Tabla 16. Correlación de variables de Pearson.....	54

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Consumo energético de las edificaciones.....	17
Figura 2. Fases del proceso de modelado energético.....	19
Figura 3. Modelado actual: a) Edificación - b) Apartamentos piso.....	38
Figura 4. Modelado con cortes en apartamentos	38
Figura 5. Esquema de asignación de datos	39
Figura 6. Gráfica solución de Pareto apartamento 1-B.....	47
Figura 7. Gráfica solución de Pareto apartamento 12-C.....	48
Figura 8 Matriz de correlación de variables Electricidad apartamento (1-B).....	51
Figura 9 Matriz de correlación de variables Electricidad apartamento (12-C).....	52

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Paso a paso simulación paramétrica (módulo de optimización).....	67
Apéndice B: Tabla de horario de ocupación.....	68
Apéndice C. Tablas de cerramientos	69
Apéndice D. Tabla apertura de ventanas	71
Apéndice E. Tabla cantidad de equipos y horarios de uso (ajustados).....	72
Apéndice F. Gráficas y tablas de simulaciones en DesignBuilder para los tres apartamentos.....	73
Apéndice G. Plantillas tipo de acristalamiento y muros exteriores.	75
Apéndice H Tabla cantidad de equipos y horarios de uso con HVAC	76
Apéndice I. Paso a paso módulo de optimización DesignBuilder	77
Apéndice J. Gráficas módulo de optimización en DesignBuilder	87
Apéndice K. Código en Python para realizar el análisis de correlación por el método de Pearson.....	89
Apéndice L. Matrices de correlación en Python para los objetivos CO ₂ y discomfort.....	90

Resumen

Título: Determinación de parámetros de diseño orientada a la disminución del consumo energético en edificaciones residenciales de clima cálido tropical*

Autor: Yeferson David Barón Fernández y Danilo Ernesto Niño Torres**.

Palabras Clave: Simulación energética, sensibilidad de parámetros, influencia, consumo energético, cambio climático, sostenibilidad, correlación de variables.

Descripción:

El presente trabajo de grado analiza como los parámetros eléctricos, arquitectónicos y ambientales afectan en el desempeño energético de edificaciones residenciales en clima cálido tropical, con base en un modelo actual de una edificación residencial de estrato cuatro localizada en la ciudad de Bucaramanga-Colombia el cual fue realizado en la herramienta software de simulación DesignBuilder.

En estas regiones, la demanda de energía es considerablemente alta, por lo tanto, es necesario identificar la configuración de los parámetros eléctricos, arquitectónicos y ambientales que influyen en el desempeño energético de dichas edificaciones, de un análisis paramétrico en el software de simulación energética de edificaciones DesignBuilder. En primera instancia se identifican mediante búsqueda literaria los parámetros que influyen en el desempeño energético. Se describe el proceso de obtención del modelo energético del apartamento, validando el modelo basado en los datos de consumos reales. En el análisis, se consideraron al menos cinco valores por parámetro usando el módulo de optimización, para determinar los que más impactan en el consumo energético global de la edificación.

Finalmente, se determina la configuración de un grupo de parámetros eléctricos, ambientales y arquitectónicos que permita obtener el mayor ahorro energético en los apartamentos residenciales objeto de estudio en clima cálido tropical mejorando la eficiencia energética en las edificaciones.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingeniería Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Ingeniería Eléctrica. Director: Jorge Luis Cárdenas Rangel. Magíster en Ingeniería Eléctrica. Codirector: German Alfonso Osma Pinto. Dr. en Ingeniería Eléctrica.

Abstract

Title: Determination of Design Parameters Aimed at Reducing Energy Consumption in Residential Buildings in Tropical Warm Climates*.

Author(s): Yeferson David Barón Fernández and Danilo Ernesto Niño Torres**

Key Words: Energy simulation, parameter sensitivity, influence, energy consumption, climate change, sustainability, variable correlation.

Description:

This thesis aims to analyze how electrical, architectural, and environmental parameters affect the energy performance of residential buildings in warm tropical climates, based on an actual model of a residential building located in Bucaramanga, Colombia, modeled using the DesignBuilder simulation software.

In these regions, energy demand is considerably high, so it is crucial to identify the configuration of electrical, architectural, and environmental parameters that influence the energy performance of these buildings through a parametric analysis using DesignBuilder energy simulation software. Initially, the parameters that influence energy performance were identified through a literature review. The process of obtaining the building's energy model is described, with validation based on real energy consumption data. The analysis considered at least five values for each parameter using the optimization module, to determine which parameters have the greatest impact on the building's overall energy consumption.

Finally, a configuration of electrical, environmental, and architectural parameters will be determined to achieve the greatest energy savings in the residential buildings under study in warm tropical climates, improving energy efficiency in these constructions.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingeniería Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Ingeniería Eléctrica. Director: Jorge Luis Cárdenas Rangel. Magíster en Ingeniería Eléctrica. Codirector: German Alfonso Osma Pinto. Dr. en Ingeniería Eléctrica.

Introducción

El estudio del desempeño energético en edificaciones de clima cálido tropical es fundamental para evaluar la eficiencia de los sistemas y promover construcciones más sostenibles, ya que estas zonas presentan una alta demanda energética. En estos entornos, el consumo energético de los edificios se ve afectado debido a aspectos como la orientación, materiales de construcción, eficiencia de los sistemas de climatización, iluminación, ventilación natural y mecánica, entre otros. Por lo que se requiere de un adecuado diseño energético para reducir el consumo de energía, costos, minimizar el impacto ambiental y mejorar la calidad de vida de los habitantes.

De manera general, se estima que el sector de las edificaciones consume aproximadamente el 34% de la demanda energética global, aumentando en promedio el 1% cada año durante la última década, y son responsables del 37% de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂). A nivel nacional de acuerdo con el balance energético colombiano (BECO) el consumo de energía eléctrica de este sector es cercano 37% por encima de sectores como el industrial. De acuerdo con datos de la Unidad de Planeación Minero – Energética UPME las proyecciones de demanda para el periodo 2023 – 2037 a mediano plazo indican que la demanda de energía eléctrica podría tener un crecimiento promedio anual entre un 1,65% a 2,99% en Colombia. Por lo que el consumo energético en las edificaciones representa un problema.

En Colombia, existen normativas que incentivan el ahorro energético en edificaciones a través de un mejor diseño energético. Destaca el caso de la Resolución 0549 de 2015, esta establece los porcentajes mínimos y medidas de ahorro de agua y energía en nuevas edificaciones, con el objetivo de reducir el consumo de agua y energía en las nuevas edificaciones. La norma

recomienda medidas activas (comprenden el uso de sistemas de aire acondicionado, ventilación artificial, iluminación eléctrica, entre otras) y medidas pasivas (consideran el clima, localización, orientación, protección solar, selección de materiales, aislamiento, entre otras).

Recientemente, el gobierno nacional, a través de su Plan Nacional de Desarrollo (2022-2026) incluyó dentro de las medidas prioritarias promover la eficiencia energética en las edificaciones. Teniendo en cuenta, las metas de ahorro identificadas en el PAI-PROURE.

No obstante, obtener edificaciones con bajo consumo energético es un objetivo que aún no se la logrado aterrizar en el proceso de diseño, quizás por barreras como el desconocimiento de técnicas o estrategias de ahorro de energía y su configuración en el diseño de la edificación.

En la literatura es frecuente encontrar estudios relacionados con la evaluación del impacto de la integración de estrategias de ahorro de energía en edificaciones. Sin embargo, estos estudios no son frecuentes en el clima tropical. Por lo tanto, resulta crucial llevar a cabo un estudio que no solo contribuya a una mejor comprensión de los factores que influyen en el rendimiento energético de las viviendas en climas cálidos tropicales, sino que también ofrece una base sólida para el desarrollo de estrategias de construcción sostenible.

Por tal motivo, este trabajo de grado analiza el efecto que algunos parámetros eléctricos, arquitectónicos y ambientales tienen en el desempeño energético de edificaciones residenciales en clima cálido tropical. Por lo tanto, a partir del modelado energético de una edificación residencial multifamiliar de media altura localizada en la ciudad de Bucaramanga, se realiza un análisis paramétrico que permite establecer la configuración más favorable para reducir el consumo de energía, con el propósito de avanzar en la sostenibilidad ambiental, mejorar el confort y la calidad de vida de los habitantes en el contexto colombiano.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Establecer la configuración de un conjunto de parámetros eléctricos, ambientales y arquitectónicos que propendan por la disminución del consumo energético en edificaciones residenciales de clima cálido tropical.

1.2 Objetivos específicos

Identificar un grupo de parámetros con influencia en el desempeño energético de edificaciones residenciales tropicales con base en una revisión bibliográfica.

Establecer el modelo energético de una edificación residencial localizada en clima cálido tropical.

Realizar un análisis de sensibilidad de parámetros con influencia en el desempeño energético de edificaciones residenciales de clima cálido tropical a partir de simulaciones energéticas.

Determinar la configuración de un grupo de parámetros eléctricos, ambientales y arquitectónicos que permita obtener el mayor ahorro energético en edificaciones residenciales de clima cálido tropical.

2. Marco Teórico

El marco teórico proporciona los fundamentos necesarios para comprender los principales factores que influyen en el consumo energético de las edificaciones. A continuación, se analizará específicamente el comportamiento del consumo energético en edificaciones residenciales, destacando su relevancia en climas cálidos tropicales y su impacto en la eficiencia energética de edificaciones.

2.1 Consumo energético de las edificaciones residenciales

El consumo energético de una edificación residencial suele dividirse en aspectos energéticos tales como: electrodomésticos, cocina, iluminación, climatización entre otros (Hernández, s. f.). Para clima cálido tropical el consumo energético de las edificaciones puede ser significativamente elevado a causa de los factores climáticos.

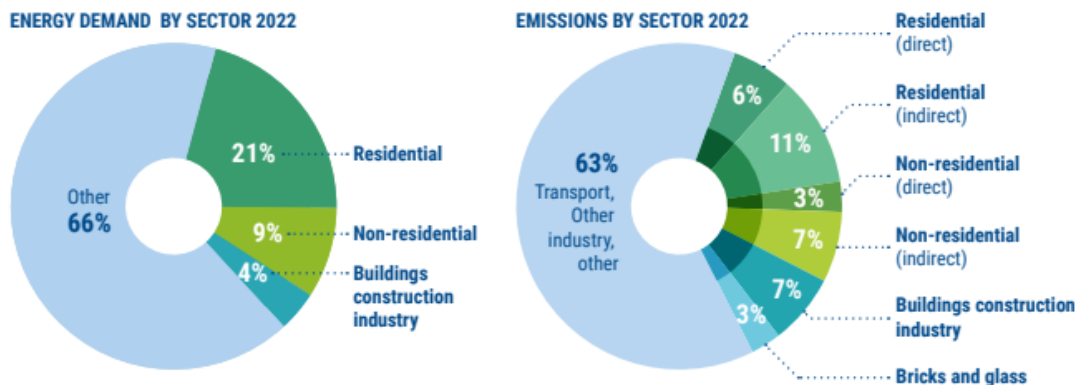
De manera general, se estima que el sector de las edificaciones representa aproximadamente el 30% de la demanda energética global siendo principalmente para necesidades operativas como calefacción y refrigeración llegando a un 34 % si se incluye la energía utilizada para la producción de materiales de construcción, aumentando en promedio el 1% cada año, y en donde el uso de electricidad desde el año 2010 a 2022 se ha elevado del 30% al 35% respectivamente de la demanda total de energía. Este sector es responsable del 37% de las emisiones de dióxido de carbono CO₂ (UNEP, 2024), ver Figura 1.

A nivel nacional de acuerdo con el balance energético colombiano (BECO) el consumo de energía eléctrica de este sector es cercano 37% por encima de sectores como el industrial. Según los datos de la Unidad de Planeación Minero – Energética (UPME) las proyecciones de demanda

para el periodo 2023 – 2037 a mediano plazo indican que la demanda de energía eléctrica podría tener un crecimiento promedio anual entre un 1,65% a 2,99% en Colombia.

Figura 1.

Consumo energético de las edificaciones



Nota. Distribución de consumo total de energía final y de emisiones de CO₂ en 2022 (Fuente: IEA 2023a. Tomado de (UNEP, 2024).

2.2 Normatividad energética

La normatividad tiene un papel fundamental en el tema de eficiencia energética de las edificaciones, estas establecen estándares y lineamientos que deben seguirse para tener un mejor desempeño energético. En clima cálido tropical la normatividad es de vital importancia en el contexto de las edificaciones residenciales influyendo en el diseño, construcción y medidas eficientes para gestionar el consumo energético y reducir el impacto ambiental. En Colombia existen varias leyes y decretos que abordan el tema de la eficiencia energética entre las cuales se presentan a continuación.

2.2.1 Resolución 0549 de 2015

Esta resolución establece los porcentajes mínimos y medidas de ahorro de agua y energía en nuevas edificaciones, con el objetivo de reducir el consumo de agua y energía en las nuevas edificaciones. La norma recomienda medidas activas (comprenden el uso de sistemas de aire acondicionado, ventilación artificial, iluminación eléctrica, entre otras) y medidas pasivas (consideran el clima, localización, orientación, protección solar, selección de materiales, aislamiento, entre otras).

2.2.2 CONPES 3919

“Política Nacional de Edificaciones Sostenibles” documento mediante el cual se priorizan algunas acciones para dinamizar la construcción sostenible a nivel nacional impulsando la inclusión de criterios de sostenibilidad dentro del ciclo de vida de las edificaciones, a través de instrumentos para la transición, seguimiento y control, e incentivos financieros que permitan implementar iniciativas de construcción sostenible con un horizonte de acción hasta el 2025 (Santos et al., 2018).

2.2.3 PAI PROURE 2022-2030

Es un documento guía para la intervención del estado en materia de eficiencia energética el cual tiene como visión para el 2030 reducir las brechas tecnológicas en el uso de la energía, mediante la adopción de medidas, dispositivos y equipos costo-eficientes. Haciendo referencia a la construcción de edificaciones de manera sostenible en cuanto al diseño, método de construcción y materiales utilizados que permitan alcanzar reducciones en el consumo de energía garantizando el nivel de confort, adoptando estrategias pasivas y activas que permitan hacer un mejor uso de la energía (Mesa et al., s. f.).

2.2.4 Plan de desarrollo nacional

El gobierno nacional a través de su Plan Nacional de Desarrollo (2022-2026) el cual incluye diversas metas y perspectivas que están enfocadas en la transición energética y la sostenibilidad del país, orientándose en la incorporación de nuevas tecnologías y el uso de energías renovables (solar, eólica y geotérmica) en diferentes sectores, para el sector residencial se incluyó dentro de las medidas prioritarias promover la eficiencia energética en las edificaciones en todas las fases de su ciclo de vida implementando nuevas tecnologías y fomentando la reducción del consumo de energía (Departamento Nacional de Planeación, 2023).

2.3 Modelado energético de edificaciones

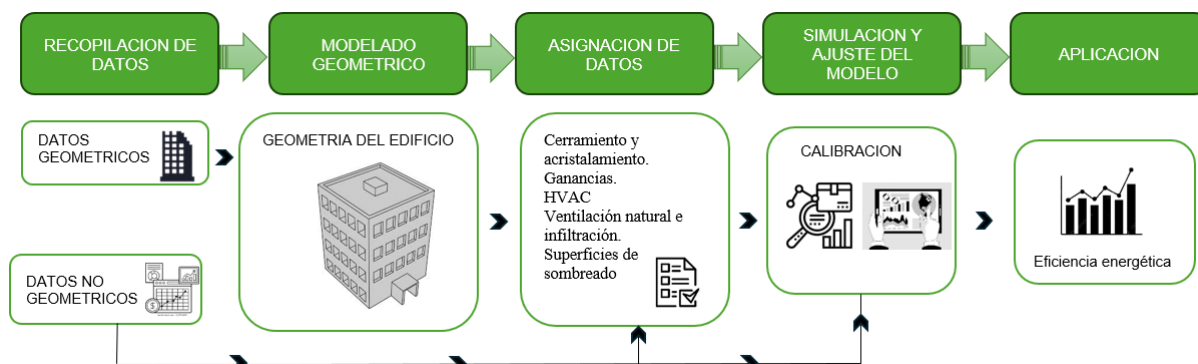
El modelado energético de los edificios es utilizado con el fin de estudiar el rendimiento energético, teniendo como objetivo considerar diseños alternativos, revisar y seleccionar sistemas y subsistemas, fijar los presupuestos anuales de energía, cumplir los estándares energéticos y optimizar la economía durante el tiempo que conlleva al diseño del edificio (Gao et al., 2019).

2.3.1 Proceso de modelado energético

El proceso de modelado energético está compuesto generalmente por las cinco fases que se muestran en la Figura 2.

Figura 2.

Fases del proceso de modelado energético



Nota. Fases del modelado geométrico. Adaptación de la gráfica de (Pan et al., 2023) .

Los datos geométricos están presentes en cuanto a las dimensiones del edificio, aberturas, orientación, relación ventana pared (WWR) entre otros y los datos no geométricos claves incluyen la temperatura exterior, radiación solar, humedad, eficiencia de electrodomésticos, horarios de operación y calidad del aire interior. Estos factores influyen en la demanda energética del edificio, permitiendo optimizar el consumo a través de simulaciones precisas.

2.3.1.1 Recopilación de datos. En esta fase, es crucial obtener información detallada sobre la geometría del edificio, materiales de construcción, sistemas HVAC, patrones de ocupación y condiciones climáticas locales. Estos datos son fundamentales para crear una base precisa sobre la cual se desarrollará el modelo (Fumo, 2014).

2.3.1.2 Modelado geométrico. Consiste en la elaboración de un modelo tridimensional preciso del edificio, considerando la forma del edificio, la altura, el número de pisos y la zonificación térmica. Este paso es fundamental para capturar las características físicas y espaciales del edificio (Chen & Hong, 2018).

2.3.1.3 Asignación de datos. Implica la introducción de información específica como la condición climática del sitio, la forma y los materiales de la envolvente del edificio, las aberturas y sus alrededores, el equipamiento y los patrones de ocupación. A partir de esta información se obtienen las condiciones ambientales interiores (temperatura, humedad, calidad del aire) y las demandas energéticas, cabe aclarar que la precisión en este paso determina la fiabilidad del modelo (Del Ama et al., 2023).

2.3.1.4 Ajuste del modelo. Involucra la calibración del modelo mediante la comparación con datos reales de consumo energético y ajustando parámetros para mejorar la precisión del

modelo (Raftery et al., 2011). Esto asegura que el modelo represente fielmente el comportamiento energético del edificio en condiciones reales.

2.3.2 Herramientas y software de simulación energética

Dentro de las herramientas de simulación se destacan las siguientes:

2.3.2.1 EnergyPlus. Es un programa basado en las características y capacidades más populares de BLAST y DOE-2.1E. Es una estructura modular bien organizada para facilitar la adición de funciones y enlaces de otros programas. Comprende un código estructurado, modular y completamente nuevo escrito en Fortran 90. EnergyPlus realiza cálculos detallados de la carga térmica, iluminación, transferencia de calor, calefacción, ventilación, calidad del aire interior y consumo energético, entre otros aspectos (Crawley et al., 2001).

2.3.2.2 eQuest. Es una herramienta de simulación para el análisis del rendimiento energético que proporciona resultados de alta calidad. Combina varios asistentes: un asistente para el modelado energético que permite el diseño y la simulación de edificios, uno para el cálculo de transferencia de calor; un asistente para el análisis de cargas térmicas y un asistente para la evaluación de consumos energéticos de los sistemas y equipos del edificio. Utiliza el motor de simulación DOE-2 que proporciona cálculos detallados y gráficos para la toma de decisiones (Rallapalli et al., 2010).

2.3.2.3 DesignBuilder. Es una herramienta especializada en la simulación energética y medioambiental de edificios, permite evaluar aspectos como niveles de confort, consumo de energía y emisiones de carbono. Ofrece 9 módulos de análisis integrados entre sí para optimizar flujos de trabajo, cada uno brinda un tipo de análisis específico, entre ellos están el módulo de visualización, simulación, optimización, de costo, CFD (dinámica computacional de fluidos),

HVAC, LEED y (Energy management System), estos módulos facilitan un análisis muy completo y específico (Ordoñez, 2017).

2.3.2.4 IES VE. Es un programa de simulación utilizado en el diseño de edificios energéticamente, su análisis incluye simulaciones energéticas de todo el edificio, selección y dimensionamiento de sistemas HVAC, confort, iluminación natural, cálculos de carga, estudios solares, comprobación del cumplimiento del código y egresión. VE utiliza su propio motor de simulación APACHESIM sin permitir a los usuarios ningún tipo de acceso al archivo de entrada de simulación para una posible inspección o modificación manual (Elnabawi, 2020).

2.3.2.5 DOE-2. Es un programa de simulación que calcula el rendimiento energético y el costo de vida operativa del edificio usando datos horarios. Se ingresan como datos de entrada los datos climáticos, ubicación y dirección del edificio, elementos de construcción, tipo de material, las propiedades, el diagrama del proceso de uso del edificio, los datos de los sistemas de servicio y los precios de los componentes. Los datos de salida incluyen 50 informes resumidos mensuales o anuales diferentes, informes de análisis de 700 variables energéticas diferentes por hora dependiendo de la configuración del usuario (Obaid & Akkoyunlu, 2022, p. 140).

2.4 Parámetros con influencia en el desempeño energético de edificaciones residenciales

Los parámetros que influyen en el desempeño energético de edificaciones residenciales, deben ser objeto de análisis, con el fin de comprender como afectan directamente en la eficiencia energética, el confort térmico y la sostenibilidad ambiental. Por tal motivo, a continuación, se presentan diferentes parámetros eléctricos, arquitectónicos y ambientales que inciden en el consumo de energía.

2.4.1 Parámetros eléctricos

Los parámetros eléctricos, como la eficiencia de los electrodomésticos, sistemas de iluminación, HVAC, y el uso de energía renovable, impactan directamente la demanda energética. A continuación, se detallan los principales parámetros eléctricos que inciden en el consumo de energía en edificaciones residenciales.

2.4.1.1 Eficiencias de los electrodomésticos. Según la Agencia Internacional de la Energía (AIE), los electrodomésticos representan el 17% del consumo eléctrico en edificios, aumentando continuamente en regiones como China, India y Oriente Medio, en comparación con los niveles del año 2000. En contraste, en regiones altamente desarrolladas como América del Norte y la Unión Europea, el crecimiento ha sido más moderado. Actualmente, solo un tercio del consumo energético de los electrodomésticos está regulado por estándares obligatorios de eficiencia. Según el quinto informe del IPCC (Panel intergubernamental sobre el cambio climático), el uso de electrodomésticos eficientes podría disminuir el consumo de electricidad previsto. Para abordar este desafío, políticas como los estándares de eficiencia energética obligatorios se han implementado en varios países. En 2018, programas de Estándares y Etiquetado de Eficiencia Energética (EES&L) en países como Estados Unidos, China, y la Unión Europea lograron reducir el consumo de electricidad en 1580 TWh, equivalente a la producción total de energía solar y eólica en esos países (Vérez et al., 2022).

2.4.1.2 Eficiencia de los sistemas de iluminación. Los sistemas de iluminación eficiente utilizan menos energía para proporcionar una cantidad exacta de luz de acuerdo a las necesidades. Las estrategias para reducir el uso de energía se centran en dispositivos de iluminación eficiente (balastos, lámparas, luminarias) y un uso óptimo de la luz natural (Considerando el exceso de luz

natural en las cargas de refrigeración) estos dependen de la aplicación, ocupación del espacio, la luz natural disponible y el sistema de control utilizado (Harvey, 2009).

2.4.1.3 Eficiencia de los sistemas HVAC. Las condiciones de temperatura del aire exterior, humedad relativa, características del viento, condiciones de ocupación y el flujo de calor son algunos de los parámetros que afectan la carga en el sistema HVAC. El objetivo principal del sistema HVAC es mantener la temperatura y el contenido de humedad del espacio del edificio de acuerdo con los valores umbral deseados, teniendo en consideración el movimiento del aire, la calidad y el ruido. La utilización de sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado de alta eficiencia mejora el rendimiento energético general del edificio (Harish & Kumar, 2016).

2.4.1.4 Energía renovable. Se presenta como alternativa para reducir el consumo de energía, derivada de procesos naturales renovables, es uno de los aspectos principales de la eficiencia energética en un edificio, facilita la generación de electricidad y calor a partir de recursos como el sol y el viento. Una cantidad importante de las necesidades de calor y electricidad de los edificios se puede cubrir eficazmente mediante el uso de colectores solares térmicos y fotovoltaicos, minimizando así el uso de fuentes de energía convencionales y disminuyendo los gases de efecto invernadero (Chel & Kaushik, 2018).

2.4.2 Parámetros arquitectónicos

Los parámetros arquitectónicos, como el diseño, los materiales, la orientación, el aislamiento y el sombreado solar son cruciales para reducir el consumo de energía, la demanda de climatización y mejorar el confort térmico. A continuación, se describen los principales parámetros arquitectónicos que impactan el consumo de energía en edificaciones residenciales.

2.4.2.1 Diseño arquitectónico. Un diseño arquitectónico eficiente puede maximizar la ventilación natural y la iluminación, disminuyendo la necesidad de sistemas mecánicos. Según

Hensen y Lamberts (2019), un diseño que considere la orientación, distribución espacial y la relación ventana/pared (WWR) puede mejorar significativamente la eficiencia energética.

2.4.2.2 Materiales de construcción. Los materiales con alta capacidad térmica pueden almacenar y liberar calor, mejorando la eficiencia energética del edificio. Fumo (2014) menciona que el uso de materiales adecuados puede reducir las cargas térmicas y mejorar el confort interior.

2.4.2.3 Orientación del edificio. Una orientación adecuada maximiza el aprovechamiento de la luz solar y la ventilación natural. Crawley et al. (2008) destacan que la orientación del edificio puede influir en las ganancias y pérdidas térmicas, afectando directamente el consumo energético.

2.4.2.4 Aislamiento térmico. Un buen aislamiento térmico reduce las pérdidas de calor en invierno y las ganancias de calor en verano, disminuyendo la demanda energética. La norma ASHRAE (2020) proporciona especificaciones detalladas sobre los niveles óptimos de aislamiento para clima tropical.

2.4.2.5 Sombreado solar. Los elementos como voladizos, aletas, persianas y las sombras proyectadas por edificios cercanos tienen un impacto significativo en la iluminación natural y la eficiencia térmica de un edificio. El principal objetivo del sombreado es evitar que la luz solar directa alcance las paredes y ventanas exteriores. Los dispositivos de sombra pueden ser afectados por la forma y orientación del edificio. Al diseñar fachadas con elementos de sombreado, se deben considerar factores como la cantidad de luz natural requerida y la ubicación del edificio (Latha et al., 2023).

2.4.3 Parámetros ambientales

Las condiciones ambientales, como la temperatura exterior, la radiación solar, entre otros, afectan directamente las cargas térmicas del edificio, generando la necesidad de consumos de

energía destinados a sistemas de climatización. A continuación, se analizan los principales parámetros ambientales y su impacto en el consumo energético y el confort interior.

2.4.3.1 Temperatura exterior. Es un factor crucial en el modelado energético de edificios, influyendo en la temperatura interior debido a que la envoltura del edificio almacena el calor, afectando directamente la carga térmica del mismo, que a su vez determina la necesidad de calefacción y refrigeración para mantener un ambiente interior confortable (Lin et al., 2023).

2.4.3.2 Radiación solar. Es fundamental en la evaluación energética de los edificios mediante programas de simulación, teniendo un impacto en la ganancia térmica y la iluminación natural. La radiación solar que incide sobre un edificio depende de su ubicación geográfica y diseño, teniendo la necesidad de implementar sombreado y sistemas de aislamiento en la envolvente (Kim et al., 2016).

2.4.3.3 Ventilación natural. Se refiere al proceso en el que el aire presente al interior de un edificio se renueva mediante la extracción o inyección del aire mediante aberturas o conductos que permitan aprovechar los cambios en el viento, la humedad, el sol, entre otros. Sin tener que utilizar energía de forma mecánica para funcionar (Lozano & Paul, 2010).

2.4.3.4 Humedad. Influye en el confort térmico interior y en la eficiencia del sistema de climatización, ya que la transferencia de humedad a través de la envolvente del edificio y el ambiente interior es muy importante. La alta humedad puede hacer que los espacios interiores se sientan más cálidos, llevando a un mayor uso de aire acondicionado. La interacción entre humedad y temperatura juegan un papel clave en el desempeño energético (Yang et al., 2015).

2.4.4 Régimen de uso u ocupación

En edificios residenciales se consideran parámetros como la utilización y la ocupación de las áreas interiores en el transcurso del tiempo. El uso del edificio se refiere a la cantidad de

personas que lo utilizan, medida en m^2 /persona. Con respecto a la ocupación del edificio es determinada por los tiempos de operación (horas diarias, días de la semana y del año) y los niveles de ocupación del edificio (porcentaje de ocupantes presentes en un momento determinado) influyendo en la eficiencia energética del mismo (Sekki et al., 2015).

2.5 Análisis de sensibilidad y optimización

El análisis de sensibilidad se describe como la etapa en la cual se determinan los parámetros de entrada más influyentes que afectan a un modelo en su salida (Mauthe et al., 2020). En cuanto al desempeño energético se sugiere realizar un análisis de sensibilidad y optimización para los edificios residenciales, con el fin de identificar parámetros eléctricos, arquitectónicos y ambientales que tienen influencia en el consumo energético y el confort térmico, y así encontrar alternativas que mejoren la eficiencia energética y reduzcan el impacto ambiental.

2.5.1 Métodos de análisis de sensibilidad

2.5.1.1 Análisis de sensibilidad local. Este método se enfoca en realizar la variación de un parámetro a la vez mientras los demás se mantienen fijos. Este método es de gran utilidad para generar una primera aproximación de la influencia de cada parámetro (Wei, 2013).

2.5.1.2 Análisis de sensibilidad global.

2.5.1.2.1 Método de Sobol. Este método se basa en la descomposición de la varianza para determinar la influencia de cada parámetro y las interacciones entre los parámetros realizando cálculos sobre la influencia de la varianza de uno o de varios parámetros de entrada en la varianza total de salida (Lai et al., 2021).

2.5.1.2.2 Método de Morris. Este método permite identificar los parámetros de entrada más influyentes y aquellos que interactúan más entre sí, filtrando las entradas que no son significativas en el modelo (C. Wang et al., 2020).

2.5.1.2.3 Simulación de Monte Carlo. Este método de simulación realiza un muestreo aleatorio para estimar cómo la variabilidad en los parámetros de entrada afecta los resultados del modelo (Harrison, 2009).

2.5.1.2.4 Método de regresión lineal múltiple (MLR). Este método emplea el análisis de regresión, una técnica estadística para estudiar la relación entre diferentes variables, con el fin de cuantificar la relación entre sí de las variables independientes con las variables dependientes (Vila et al., 2019).

2.5.2 Optimización

Consiste en ajustar múltiples variables de diseño para mejorar el rendimiento energético y el confort térmico, minimizando costos y emisiones de carbono (Vukadinović et al., 2021). Utilizando DesignBuilder, este análisis se realiza mediante simulaciones iterativas que evalúan diversas combinaciones de diseño. El módulo de optimización emplea algoritmos evolutivos para identificar las mejores soluciones. Además, se pueden realizar análisis de incertidumbre y sensibilidad para determinar la influencia de diferentes variables en los resultados, facilitando decisiones de diseño más informadas y eficientes (DesignBuilder Software Ltd, s. f.). En el Apéndice A se detalla el paso a paso para realizar un análisis de sensibilidad con el módulo de optimización de DesignBuilder.

3. Desarrollo de la solución

En esta sección del documento, se presentan los métodos utilizados en la investigación y los resultados obtenidos, con el propósito de verificar el cumplimiento de los objetivos previamente establecidos para este trabajo de grado.

3.1 Revisión bibliográfica

Utilizando la biblioteca virtual de la Universidad Industrial de Santander, que incluye la herramienta Scopus, se ingresaron una serie de palabras clave en diferentes combinaciones. Los resultados se filtraron seleccionando los artículos que tienen un mayor número de citación, obteniendo documentos con información relevante respecto a la temática a tratar presentes en la Tabla 1.

Tabla 1.

Palabras claves y Ecuaciones de búsqueda

Palabras clave	Cantidad de documentos seleccionados
Energy performance AND residential buildings AND tropical climate	4
Energy modeling AND residential buildings AND sensitivity analysis	1
Simulation AND energy efficiency AND residential buildings AND tropical AND climate	1
Energy AND performance AND residential AND buildings	5
Tropical AND climate AND buildings AND energy AND efficiency	2
Energy AND simulations AND sensitivity AND analysis AND residential	1
Residential AND energy AND consumption	1
Tropical AND residential AND buildings	1
Sustainable AND architectural AND design	1
Passive AND ventilation AND buildings	3

Nota. Palabras clave en la búsqueda de documentos. Recursos propios.

En la búsqueda realizada, se encontraron diferentes artículos de los cuales se recopiló información relevante, como el nombre, país, clima, tipo de edificio, herramienta de análisis y los parámetros claves para realizar los estudios. La información más relevante de cada uno de los 20 artículos seleccionados se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2.

Artículos sobre el análisis del impacto de parámetros en edificaciones

Nº	Autores Cit. / Año	DOI / Nombre	País	Clima / Tipo de edificio	Herramienta de análisis	Parámetros analizados
1	Dodoo & Ayarkwa (2019)	10.3390/buildings9100215 Efectos del cambio climático para el confort térmico y el rendimiento energético de los edificios residenciales en un clima del África subsahariana.	Ghana	Tropical / Residencial unifamiliar	IDA-ICE	<ul style="list-style-type: none"> Datos climáticos, temperatura ambiente, velocidad y dirección del viento, humedad relativa, radiación normal directa y la radiación difusa), ubicación, sistema de aire acondicionado, % del total de horas de los ocupantes, orientación, Operación del edificio, ganancia de calor por iluminación y electrodomésticos.
2	Utama & Gheewala (2009)	10.1016/j.enbuild.2009.07.025 Edificios residenciales de gran altura en Indonesia: una evaluación energética del ciclo de vida (evalúa el efecto de la envolvente de los edificios en el consumo de energía).	Indonesia	Tropical / Residencial de gran altura	ECOTECT	<ul style="list-style-type: none"> Eficiencia del aire acondicionado, materiales de construcción, envoltura del edificio, ajuste de temperatura promedio, ocupantes, humedad, infiltración de la zona y externa, velocidad del aire y el calor interno.
3	Pathirana et al. (2020)	10.1007/s42107-020-00280-w Enfoque sostenible del sistema de calificación energética de edificios residenciales.	Sri Lanka	Tropical / Residencial	DesignBuilder	<ul style="list-style-type: none"> Materiales de construcción, propiedades térmicas y lumínicas de los materiales, condiciones ambientales, climáticas, orientación ventanas, ubicación y tamaño de las zonas de los edificios.
4	De León et al. (2023)	10.3390/buildings13020315 Un marco de referencia para distritos de energía cero en Panamá basado en simulaciones de desempeño energético y metodología de diseño bioclimático.	Panamá	Tropical / Residencial	DesignBuilder	<ul style="list-style-type: none"> Forma de los edificios, orientación, acristalamiento, el uso de sombras, material de las paredes, configuración del aire acondicionado.
5	Neale et al. (2022)	10.1016/j.apenergy.2022.118956 Identificación precisa de parámetros de construcción influyentes mediante la integración de sensibilidad global y técnicas de selección de características.	Irlanda	Templado / Residencial	jEPlus EnergyPlus	<ul style="list-style-type: none"> Datos meteorológicos del lugar, geometría del edificio, plano de planta, materiales de construcción, componentes y sistemas HVAC, zonas térmicas dentro del edificio, patrones de ocupación, cargas de por iluminación, operación de los equipos.

N°	Autores Cit. / Año	DOI / Nombre	País	Clima / Tipo de edificio	Herramienta de análisis	Parámetros analizados
6	Cárdenas et al. (2022)	10.1016/j.jobe.2022.104402 Estimación del impacto de las medidas de eficiencia energética recomendadas por la legislación colombiana en el desempeño de edificios de viviendas de interés social y medio.	Colombia	Tropical / Residencial	DesignBuilder	<ul style="list-style-type: none"> • Orientación, sistema de iluminación, sombreado horizontal (Shad), ventilación natural (NVent), relación ventana-pared, medida del techo con acabado ligero (RPaint), configuración de ausencia de aberturas de ventilación sobre las ventanas (NVentO) e integración de sistemas de energía solar.
7	Wang & Chen (2014)	10.1016/j.enbuild.2014.07.034 Impacto del cambio climático en el uso de energía para calefacción y refrigeración en edificios en los Estados Unidos.	Estados Unidos	Varias zonas / Residencial y comercial	EnergyPlus HadCM3	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura de bulbo seco, variación de la temperatura diurna, humedad relativa, velocidad del viento, radiación solar. envolvente del edificio y ventilación natural.
8	Gou et al. (2018)	10.1016/j.enbuild.2017.09.095 Optimización pasiva del diseño de edificios residenciales de nueva construcción en Shanghái para mejorar el confort térmico interior y al mismo tiempo reducir la demanda de energía del edificio.	China	Subtropical / Residencial	EnergyPlus SimLab, jEPlus	<ul style="list-style-type: none"> • Ventilación natural, protección solar, aislamiento térmico y calefacción solar, orientación, aire acondicionado (HVAC), iluminación artificial, relación ventana-pared (WWR), valor U de la ventana, SHGC de la ventana, hermeticidad de la ventana/puerta y sombreado externo de la ventana.
9	Bichiou & Krarti (2011)	10.1016/j.enbuild.2011.08.031 Optimización de la selección de envolventes y sistemas HVAC para edificios residenciales.	Estados Unidos	Varios / Residencial	Algoritmo genético, partículas y secuencial.	<ul style="list-style-type: none"> • Características de la envolvente del edificio, la configuración del sistema HVAC y los horarios de operación.
10	Ihm & Krarti (2012)	10.1016/j.buildenv.2012.06.012 Optimización del diseño de edificios residenciales energéticamente eficientes en Túnez.	Túnez	Varias zonas / Residencial	Técnica de optimización de algoritmos genético	<ul style="list-style-type: none"> • Aire acondicionado, orientación, la ubicación y el tamaño de las ventanas, el tipo de acristalamiento, niveles de aislamiento de las paredes y el techo, iluminación, electrodomésticos, eficiencia de los sistemas de calefacción y refrigeración.
11	Ioannou & Itard (2015)	10.1016/j.enbuild.2015.01.055 Eficiencia energética y confort en edificios residenciales: sensibilidad para los parámetros del edificio y su ocupación.	Francia	Cálido / Residencial	EnergyPlus	<ul style="list-style-type: none"> • Conductividad de paredes, techo y piso, acristalamiento de ventanas U y gramo valores, espesor del marco de la ventana y orientación del edificio.

N°	Autores Cit. / Año	DOI / Nombre	País	Clima / Tipo de edificio	Herramienta de análisis	Parámetros analizados
12	Pathirana et al. (2019)	10.1007/s40095-018-0295-3 Efecto de la forma, orientación, relación ventana-pared y zonas del edificio sobre la eficiencia energética y el confort térmico de casas con ventilación natural en clima tropical.	Sri Lanka	Tropical / Residencial	DesignBuilder	• Efecto de la forma, zonas, orientación y la relación ventana-pared (WWR).
13	Dutta et al. (2017)	10.1016/j.enbuild.2017.01.018 Influencia de la orientación y el impacto del sombreado de las ventanas exteriores en el rendimiento térmico de un edificio en un clima tropical.	India	Tropical / (Hospital)	Fortran 77	• Orientación del edificio, sombreado de las ventanas exteriores y radiación solar.
14	Brea et al. (2016)	10.1016/j.enbuild.2016.10.025 Optimización del diseño de edificios residenciales mediante análisis de sensibilidad y algoritmo genético.	Litoral Argentina	Tropical / Residencial	EnergyPlus	• Calefacción, refrigeración, ventilación, iluminación, fuentes de calor internas (residentes, iluminación y el equipamiento).
15	Attia et al. (2024)	10.1016/j.cscm.2024.e03474 Mejora de la eficiencia energética de los edificios residenciales en regiones cálidas y áridas utilizando ladrillos de hormigón ligeros.	Egipto	Desértico / Residencial	DesignBuilder	• Materiales de construcción (uso de vermiculita, perlita y polvo de aluminio como aditivos a los ladrillos de cemento tradicionales).
16	Abden et al. (2022)	10.1016/j.est.2022.105880 Uso combinado de material de cambio de fase y aislamiento térmico para mejorar la eficiencia energética de edificios residenciales.	Australia	sabana tropical / Residencial	EnergyPlus	• Envoltente del edificio, ventilación natural y aislamiento térmico.
17	Shahee et al. (2024)	10.1186/s42162-024-00311-9 Reducir el consumo energético de los edificios mediante la implementación de escenarios de aislamiento y el uso de energías renovables.	Estados Unidos	Tropical / Residencial	DesignBuilder	• Aislamiento térmico, sombreado, energía solar, ubicación, orientación y aire acondicionado.

N°	Autores Cit. / Año	DOI / Nombre	País	Clima / Tipo de edificio	Herramienta de análisis	Parámetros analizados
18	Bashir et al. (2024)	10.1093/ijlct/ctad130 Efectos de la luz natural en la mejora de la iluminación y la eficiencia energética de los edificios: hacia el bajo consumo energético y de emisiones de CO2.	Arabia Saudita	Desértico / Residencial		• Sistemas de iluminación, lucernarios, pozos de luz y luz natural.
19	Baba et al. (2023)	10.1016/j.buildenv.2023.110336 Optimización del rendimiento energético de sobrecalentamiento, iluminación y calefacción en una escuela canadiense para la adaptación al cambio climático: análisis de sensibilidad y metodología de optimización multiobjetivo.	Canadá	Extremos (fríos y cálidos) / Escolar	EnergyPlus algoritmo NSGA-II	• Envoltente del edificio con alta eficiencia energética, relación ventana-pared, tipo de ventana adecuada, ventilación natural (día) y enfriamiento nocturno.
20	Araújo et al. (2024)	10.1016/j.enbenv.2023.07.002 Optimización de la modernización de edificios mediante análisis de datos: un estudio de optimización multiobjetivo y modelos sustitutos derivados de certificados de eficiencia energética.	Portugal	Mediterráneo / Varios tipos	Python	• Aislamiento, tipo de pared, calefacción, refrigeración y energía solar.

Nota. Consulta sobre artículos de investigación relacionados con el análisis de parámetros, realizados en diferentes partes del mundo con respecto a la eficiencia energética de edificaciones. Adaptado de artículos presentes en la herramienta Scopus.

Como se observa en la tabla anterior, la eficiencia energética de las edificaciones se ve afectada ampliamente por parámetros ambientales, eléctricos y arquitectónicos.

En la muestra de literatura analizada el 85 % de los estudios considera edificaciones de tipo residencial (unifamiliar y multifamiliar), el 5% de tipo comercial, el 5% de Hospitales y el 5% de carácter escolar, para los cuales se busca que sean más eficientes cada uno analizando diferentes parámetros para llevar a cabo su objetivo.

Estos estudios fueron realizados entre los años 2009 y 2024 llevados a cabo en diferentes partes del mundo y con diferentes tipos de climas, siendo de clima tropical en un 70% de los estudios, aunque en otros se estudiaron en clima frío.

La Tabla 3 relaciona los parámetros considerados en la muestra de artículos.

Tabla 3.

Parámetros analizados

Clase	Parámetro	Porcentaje de documentos de la muestra que considera este parámetro [%]
Datos climáticos	Temperatura	30
	Radiación solar	20
	Viento	10
	Humedad	45
Ubicación y orientación	Geometría	45
	Orientación del edificio	5
Sistemas energéticos	Iluminación	45
	Sistemas HVAC	35
Envolvente del edificio	Materiales	50
	Ventanas	40
Ocupantes y ventilación	Patrones de ocupación	20
	Ventilación natural	15

Nota. Parámetros analizados en los documentos consultados. Recursos propios.

En relación con los datos climáticos se encontró que la temperatura (ambiente, de bulbo seco y variación de temperatura diurna), la radiación solar (incluyendo protección solar y sombreado), la humedad relativa y velocidad del viento, fueron considerados como parámetros de análisis en el 30 %, 20%,10% y 10% respectivamente de los artículos de la muestra. Por otro lado, en cuanto a la ubicación y orientación se encontró que la orientación y geometría del edificio se consideraron entre el 45% y el 5% de documentos respectivamente.

En relación con los parámetros asociados al sistema de iluminación, se consideran tanto las estrategias de iluminación natural, como lucernarios pozos de luz, así como la iluminación artificial, incluyendo densidades de potencia de iluminación y tipos de sombreado. Estos aspectos fueron abordados en el 45% de los documentos analizados. Por otro lado, los sistemas de aire acondicionado (HVAC), específicamente el coeficiente de rendimiento (COP) para la refrigeración, fueron considerados en el 35% de los estudios. Los materiales de construcción, incluyendo propiedades térmicas y lumínicas, y las ventanas, con aspectos como orientación, acristalamiento, relación ventana- pared, sombreado, valor U y SHGC, fueron analizados en el 50% y 40% de los documentos, respectivamente. En cuanto a la ocupación y ventilación, la ventilación natural (tamaño de las ventanas) y la ocupación fueron consideradas en el 20% y 15% de los estudios, respectivamente.

3.2 Clima con enfoque a Bucaramanga

El clima es un factor que se debe tener presente cuando se habla de eficiencia energética de edificaciones residenciales, ya que influye en la variación del consumo de energía. Bucaramanga cuenta con un clima cálido tropical con las especificaciones en la Tabla 4.

Tabla 4.*Datos climáticos en Bucaramanga*

Parámetro	Registro
Elevación sobre el nivel del mar	969 [m]
Temperatura máxima	31 °C
Temperatura media	27 °C
Temperatura mínima	24 °C
Velocidad del viento	1,0–1,5 m/s
Humedad relativa	79%
Irradiación solar	4,8 kWh/m ² •día

Nota. Variables del clima. Adaptado de (Cárdenas et al., 2022).

3.3 Modelado energético del apartamento

Para el cumplimiento del segundo objetivo del trabajo de grado, se realiza el modelado energético de un apartamento de clima cálido tropical, con el fin de evaluar la configuración de un conjunto de parámetros eléctricos, ambientales y arquitectónicos que permite maximizar el ahorro energético en edificaciones residenciales de clima cálido tropical. Se ejecutarán simulaciones en DesignBuilder del modelo para analizar su comportamiento y maximizar el ahorro de energía. En este apartado se presentarán secciones como especificaciones del edificio, obtención del modelo geométrico, llenado de datos y ajuste del modelo.

3.3.1 Especificaciones del edificio

Este trabajo de grado tiene como objeto de estudio una edificación de ingresos medios multifamiliar de clima tropical que forma parte de una unidad residencial de varias torres, ubicada en la ciudad de Bucaramanga. La edificación dispone de 12 pisos cada uno con 4 apartamentos para un total de 48. Todos cuentan con las mismas especificaciones (3 habitaciones de 55 m²) salvo por un apartamento del nivel 1 (2 habitaciones de 47 m²). La fachada principal del edificio se encuentra orientada hacia el este. Específicamente, este trabajo de grado se enfoca en un grupo 3

apartamentos en el piso 1 apartamento 1-B, piso 6 apartamento 6-A y piso 12 apartamento 12-C pertenecientes a este edificio que fueron seleccionadas teniendo en cuenta parámetros como el contacto con el terreno, una altura intermedia de la edificación y el apartamento que presenta más exposición con respecto al sol.

En la Tabla 5 se encuentra la especificación de algunos elementos. Los materiales y otras características de la edificación se encuentran descritos en los Apéndices B, C y D.

Tabla 5.

Resumen elementos

Elementos	Especificación
Cubierta plana	Manto asfáltico, solera, hormigón moldeado y placa de yeso.
Entrepiso	Baldosas de cerámica/arcilla – pavimento cerámico en seco, cemento/yeso/mortero – solado de cemento, solera, hormigón moldeado y estuco plástico enlucido.
Muros interiores	Enlucido de yeso, Concrete (dense) y enlucido de yeso.
Muros exteriores	Enlucido de yeso, cemento/yeso/mortero - mortero de cemento seco, ladrillo - aireado, cemento/yeso/mortero – mortero de cemento seco y enlucido de yeso.
Placa de cimentación	Solera, hormigón moldeado, solera, arena y grava.
Ventanas	Vidrio sencillo.
Apartamentos totales / por piso	48 / 4
Ocupación media (Personas)	3

Nota. Resumen de los materiales que tienen los elementos de la edificación. Adaptado de (UIS – MINCIENCIAS –UPME, 2021).

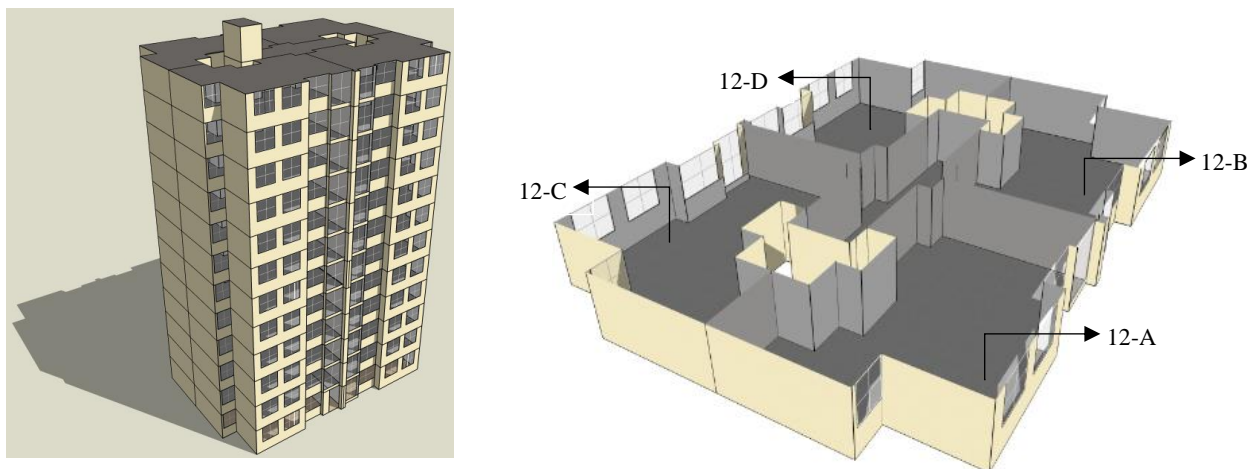
3.3.2 Obtención del modelo geométrico

En este apartado, se describe el proceso del modelo geométrico, de los apartamentos 1-B, 6-A y 12-C a partir de un modelo geométrico existente de la edificación obtenido en una investigación previa. Los modelos geométricos fueron obtenidos a partir de modificaciones en los pisos 1, 6 y 12. Estas modificaciones consistieron en separar geoméricamente el bloque

representativo de cada apartamento del bloque de cada piso. Tras este proceso se obtuvieron los modelos que se muestran en las Figura 3 y Figura 4.

Figura 3.

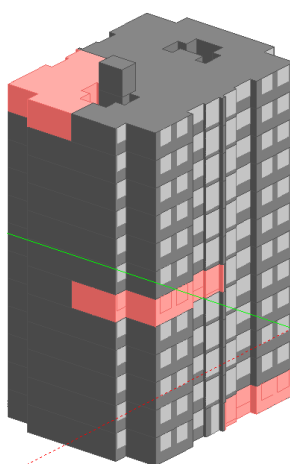
Modelado actual: a) Edificación - b) Apartamentos piso



Nota. Modelado de la edificación de clima tropical a) Doce pisos b) Vista de un piso con sus 4 apartamentos en DesignBuilder V6. Tomado de (UIS – MINCIENCIAS –UPME, 2021)

Figura 4.

Modelado con cortes en apartamentos



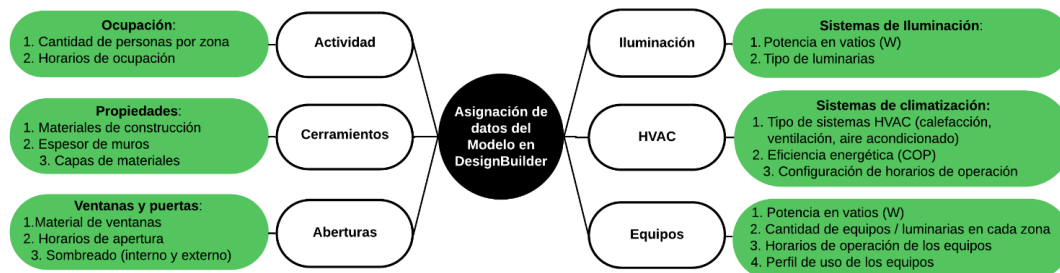
Nota. Modelado con cortes en los apartamentos 1-B, 6-A y 12-C. Adaptado de (UIS – MINCIENCIAS –UPME, 2021).

3.3.3 Llenado de datos

En esta fase, se realiza el llenado de datos correspondientes a los apartamentos objeto de estudio. La Figura 5 presenta el esquema de asignación de datos para el modelo en DesignBuilder.

Figura 5.

Esquema de asignación de datos



Nota. Esquema de asignación de datos para el modelo en DesignBuilder. Recursos propios.

Se realiza una breve descripción de la información asociada a las pestañas de datos en DesignBuilder para los apartamentos objeto de estudio.

3.3.3.1 Actividad y equipos. La pestaña de actividad, tiene como función definir el uso y ocupación de las zonas en la edificación, para este caso los apartamentos objeto de estudio cuentan con 3 habitaciones por lo que se ha asumido una ocupación media de 3 personas. La configuración de los espacios de los apartamentos se tiene de manera general ya que no se realizaron divisiones internas y por lo tanto cada apartamento se representa como una sola zona térmica.

En esta pestaña también es posible configurar las cargas de los apartamentos. Estas fueron modeladas en forma de “ganancias simplificadas” con la finalidad de usarlas como una variable para el análisis paramétrico. Estas ganancias se enfocan en la estimación de la densidad de potencia (W/m^2) asociada a diferentes categorías de electrodomésticos como se muestra en la Tabla 6. El horario de ocupación y de uso de los electrodomésticos se presentan en el Apéndice E.

Una vez configurados los datos descritos en el modelo, se procede a realizar la simulación en el software DesignBuilder.

Tabla 6.

Equipos por apartamento o zona

Cant.	Equipo	Categoría	Potencia (W)	Densidad de potencia (W/m²)	Fracción radiante
1	Computador escritorio	Computadoras	200	3,64	0,22
1	MODEM	Equipos de oficina	15	0,27	0,10
1	Teléfono inalámbrico				
1	Nevera	Cocina	260	4,73	0,18
1	Campana extractora				
13	Led	Iluminación	156	2,84	0,17
2	Televisor	Misceláneos	710	12,91	0,27
2	Ventilador				
1	Lavadora				

Nota. Cantidad de equipos presentes por apartamento. Adaptado de (UIS – MINCIENCIAS – UPME, 2021).

3.3.3.2 Cerramientos y aberturas. En la pestaña de cerramientos se especifican las propiedades de las superficies que componen la envolvente de la edificación como paredes, techos, fachadas y suelos. Se definen los materiales (espesor y capas) que se tenían previamente para este modelo, adicionalmente se tiene el valor de la transmitancia de calor (U) que es calculado por DesignBuilder para los cerramientos. Esta información se encuentra de manera detallada en el Apéndice C.

En cuanto a la pestaña de aberturas se realizó la configuración de ventanas, puertas entre otras aberturas de las edificaciones (incluyendo el tipo de vidrio, orientación, relación ventana pared WWR, marco y sombreado). En este caso se tienen para la edificación objeto de estudio previamente identificados dos tipos de ventanas las cuales emplean un tipo de abertura deslizante y marco de aluminio, con medidas de 1,5 m de alto x 1,5 m de ancho para habitaciones y 1,5 m de

alto x 2,17 m de ancho para zonas comunes en los apartamentos. Las especificaciones detalladas se encuentran en la Tabla 7 la información restante como los horarios y % de apertura se encuentran en el Apéndice D.

Tabla 7.

Especificaciones de las ventanas

Zona	Material	Espesor (mm)	Factor solar	Coefficiente de sombra	U (W/m ² K)
Habitaciones	Vidrio Sencillo	0,004	0,85	0,82	5,87
Zonas comunes aptos	Vidrio Sencillo	0,005	0,85	0,82	5,87

Nota. Especificaciones de las ventanas de la edificación. Adaptado de (UIS – MINCIENCIAS – UPME, 2021).

3.3.3.3 Iluminación y HVAC. En la pestaña de iluminación se especificó el tipo de luminaria y la potencia de estas en watts (W). Sin embargo, se calculó el valor de la densidad de potencia para incluirla como parámetro en el análisis. La información ingresada en esta categoría se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8.

Equipos por apartamento o zona (iluminación)

Cant.	Equipo	Categoría	Potencia (W)	Densidad de potencia (W/m ²)	Fracción radiante
13	Led	Iluminación	156	2,84	0,17

Nota. Cantidad de luminarias presentes por apartamento. Adaptado de (UIS – MINCIENCIAS – UPME, 2021).

Para la pestaña de HVAC no se configuró inicialmente un sistema de aire acondicionado ya que el modelo real no cuenta con dicho sistema.

3.3.4 Ajuste del modelo

De acuerdo a los datos cargados a la herramienta DesignBuilder, se realizaron tres (3) simulaciones que permitieron el ajuste del modelo para los apartamentos seleccionados (1-B, 6-A y 12-C) del edificio objeto de estudio, una por cada apartamento. El ajuste de los modelos de los apartamentos se realizó a partir de la comparación entre los resultados de las simulaciones con los datos mensuales promedio del consumo de energía de todos los apartamentos del edificio proporcionados por la empresa comercializadora de energía local para un periodo de 55 meses.

En la estimación de los valores promedio fue necesario realizar un proceso de depuración de los datos proporcionados por la empresa comercializadora de energía, ya que al menos ocho (8) de los apartamentos del edificio estuvieron desocupados o presentaban un consumo de energía muy bajo. Por este motivo, los datos asociados a estos apartamentos fueron descartados. En la Tabla 9 se muestra el resumen del consumo promedio para los 40 apartamentos restantes en un periodo de 48 meses, la totalidad de los datos se encuentra en un archivo Excel denominado “Consumo Edificio” hoja 1 presentado como anexo a este documento.

Tabla 9.

Promedios por mes para 48 meses de consumo de energía eléctrica en (kW/h)

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
109,92	100,31	111,71	112,21	119,79	118,49	113,37	112,88	112,13	113,65	112,30	114,51

Nota. El promedio total de los 48 meses para los 40 aptos es de 110,84 kW/h. Recursos propios.

El ajuste de los modelos energéticos representativos de los apartamentos se realizó afinando los datos relacionados con el horario de uso de los equipos para las categorías de computadoras, equipos de oficina, cocina, misceláneos e iluminación como se muestra en el Apéndice E.

Teniendo en cuenta que se tienen los datos medidos mensuales de energía eléctrica, la ASHRAE Guideline 14 recomienda como criterio de aceptación un error mensual máximo del 5% (Cárdenas, 2017), por lo cual se deben ajustar las especificaciones del modelo en DesignBuilder con el objetivo de que los valores de consumo simulado con respecto a los valores de consumo medido para cada mes en un periodo mínimo de un año cumplan con este requisito. Los datos del consumo medido, consumo simulado y el porcentaje de error mensual de los apartamentos para cada mes están en la Tabla 10.

Para calcular el error% mensual y anual se utilizó la Ecuación 1:

$$error \% = \left(\frac{|Consumo_{simulado} - Consumo_{Medido}|}{Consumo_{medido}} \right) * 100\% \quad (1)$$

Tabla 10.

Consumo energético de 12 meses en (kW/h) y el error%

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Simulado	114,99	103,64	114,42	111,20	114,99	110,64	114,99	114,91	110,71	114,99	111,13	114,50
Medido	109,92	100,31	111,71	112,21	119,79	116,09	113,37	112,88	112,13	113,65	112,30	114,51
error%	4,61%	3,32%	2,43%	0,89%	4,01%	4,69%	1,43%	1,80%	1,26%	1,18%	1,04%	0,01%

Nota. Presenta el error mensual entre el consumo medido y el consumo simulado. Recursos propios.

Se determinó que tanto el error porcentual mensual para un periodo mínimo de un año no supero un error del 5%, lo que nos asegura un adecuado ajuste para las posteriores simulaciones en DesignBuilder.

Al realizar las simulaciones se obtuvieron las Figura 1, Figura 2 y Figura 3 de los apartamentos seleccionados (1-B, 6-A y 12-C) respectivamente que presentan las curvas del

consumo de energético mensual de cada apartamento y se evidencian en el Apéndice F. El resumen del consumo de energía simulado se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11.

Consumo de energía eléctrica simulado para 12 meses en (kW/h)

Apto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1- B	114,93	103,59	114,37	111,15	114,93	110,59	114,93	114,86	110,66	114,93	111,08	114,44
6- A	115,02	103,67	114,45	111,23	115,02	110,67	115,02	114,94	110,74	115,02	111,16	114,53
12- C	115,01	103,66	114,45	111,23	115,01	110,66	115,01	114,94	110,74	115,01	111,16	114,52

Nota. El promedio total de los 3 aptos para los 12 meses es de 112,59 kW/h. Recursos propios.

Dado que, los apartamentos 6-A y 12-C tienen consumos similares se realiza el análisis únicamente de los apartamentos 1-B y 12-C.

3.4 Selección de parámetros

En la selección de los parámetros se consideró en primer lugar, la frecuencia con la que estos eran abordados en la literatura. En segundo lugar, se consideró el grado de impacto de cada parámetro en el consumo de energía de la edificación. Otro criterio de selección fue el grado de dificultad en la configuración del parámetro dentro del módulo de optimización de DesignBuilder. La cantidad de parámetros que resultaron seleccionados obedeció a restricciones propias del equipo de cómputo utilizado.

En total se seleccionaron 10 parámetros con influencia en el consumo energético de apartamentos de clima tropical. Estos parámetros se encuentran consignados en la **Tabla 12**.

Tabla 12.*Parámetros seleccionados de los documentos y configuración en DesignBuilder*

N°	Parámetro	Variable	Rango de variación
1	Acristalamiento	Tipo de acristalamiento	Plantillas
2	Muros Exteriores	Valor U	Plantillas
3	Temperatura de confort	Set point de temperatura (°C)	24°C a 28°C
4	Ocupación	Densidad de ocupación	0,018 W/m ² a 0,072 W/m ²
5	Equipos	Densidad de potencia	0,25 W/m ² a 3 W/m ²
6	Iluminación	Densidad de potencia	2,2 W/m ² a 5 W/m ²
7	Misceláneos	Densidad de potencia	10 W/m ² a 18 W/m ²
8	Orientación del edificio	Grados de orientación	0° a 355°
9	HVAC	COP	2,5 a 5
10	Apertura de ventanas	% de apertura	5% - 25%

Nota. Parámetros seleccionados para realizar la simulación paramétrica. Recursos propios.

Los rangos de variación fueron seleccionados principalmente para clima cálido tropical. En los casos que los parámetros se relacionan directamente con los apartamentos objeto de estudio se consideraron las especificaciones y el equipamiento de los mismos. Además, la definición de los rangos tomó en cuenta la oferta comercial disponible de luminarias, vidrios y muros exteriores, con el fin de que las opciones reflejen soluciones viables en el mercado.

Para el rango de variación se consideró al menos cinco (5) valores para cada parámetro seleccionado asegurando una cobertura adecuada de posibles escenarios de desempeño energético. Las plantillas para el tipo de acristalamiento y muros exteriores se encuentran en el Apéndice G.

3.5 Simulación paramétrica

Para la realización de las simulaciones paramétricas, se configuró un sistema de climatización estándar de 18000 BTU con una potencia nominal de 1,54 k/W (Challenger S.A.S, s. f.) y 1,2 k/W con tecnología inverter para el apartamento 1-B y 12-C respectivamente, que generan un incremento en el consumo de energía simulado de los apartamentos como se muestra en la comparación realizada en la Tabla 13. Este sistema fue incluido con el propósito de

cuantificar el impacto en el consumo de energía de los parámetros no asociados a la red eléctrica del apartamento (parámetros arquitectónicos y de materiales) pero que de acuerdo con la literatura presentan una influencia importante en el consumo de energía eléctrica. La capacidad del sistema de climatización fue dimensionada teniendo en cuenta la carga térmica del apartamento que debe librarse para mantener condiciones de confort (temperatura interior de 25°C) y se detallan en el Apéndice H.

Tabla 13.

Comparativa del consumo de energía simulado actual y con HVAC (kW/h)

Mes	Apto 1-B (actual)	Apto 1-B con HVAC	Apto 12-C (actual)	Apto 12-C con HVAC
Ene	114,93	168,02	115,01	176,73
Feb	103,59	156,14	103,66	161,62
Mar	114,37	166,71	114,45	177,72
Abr	111,15	167,55	111,23	168,57
May	114,93	174,15	115,01	172,95
Jun	110,59	169,52	110,66	164,06
Jul	114,93	178,64	115,01	169,68
Ago	114,86	174,70	114,94	171,52
Sep	110,66	160,35	110,74	163,85
Oct	114,93	160,92	115,01	169,58
Nov	111,08	161,23	111,16	162,76
Dic	114,44	158,15	114,52	173,30
Total	1350,47	1996,07	1351,4	2032,36

Nota. Consumo de energía eléctrica modificado con la inclusión de sistemas de HVAC. Recursos propios.

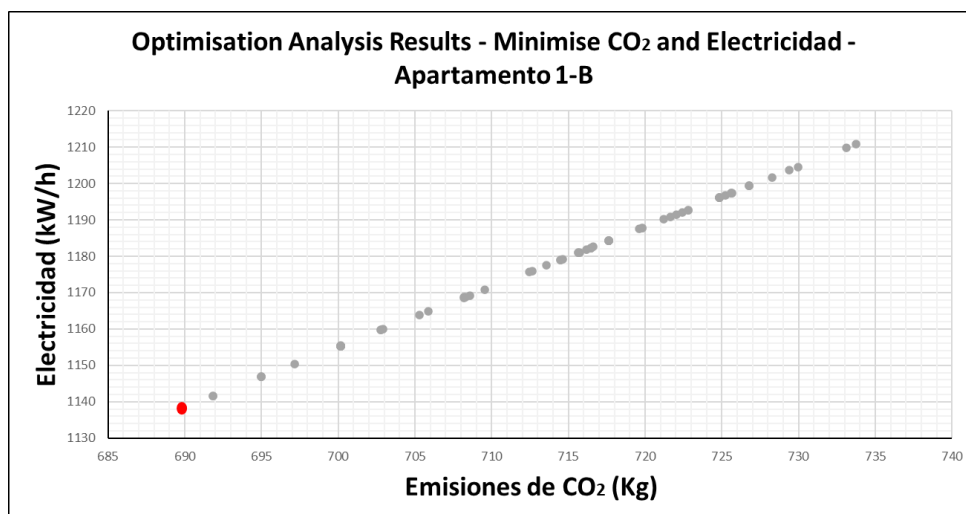
Una vez configurado el sistema de climatización, se ejecutaron las simulaciones de parámetros para los apartamentos (1-B y 12-C) mediante el módulo de optimización (paso a paso presente en el Apéndice A) integrado en el programa DesignBuilder. Este módulo permite realizar tres tipos de análisis (1- análisis paramétrico, 2- optimización y 3- incertidumbre/sensibilidad), en este caso se realizó con la opción 2- optimización, configurando como objetivos el ahorro energético (Electricidad) y las emisiones de CO₂ que son los resultados del análisis que se deben

optimizar. Como resultados adicionales se establecieron las horas de discomfort en el apartamento. También, se configuraron los 10 parámetros que van a ser modificados en el análisis, esto con el fin de definir los elementos de diseño del apartamento que pueden variarse. El proceso detallado de la configuración del módulo se encuentra en el Apéndice I.

Como resultado de las simulaciones paramétricas, se obtuvieron las gráficas de frente de Pareto (solución) con la tabla que muestra la cantidad de iteraciones y generaciones que fueron pertinentes para obtener las configuraciones que generen el mayor ahorro energético y la menor cantidad de emisiones de CO₂ en el apartamento. Las gráficas se evidencian en las Figura 6 y Figura 7. Estas figuras solo muestran los resultados para las 100 mejores soluciones (iteraciones) y en el Apéndice J se encuentran las gráficas de manera detallada que incluyen 622 iteraciones para el apartamento 1-B y 640 iteraciones apartamento 12-C. Los resultados en cuanto a las tablas (están detallados en libros de Excel Apéndices 1 y 2).

Figura 6.

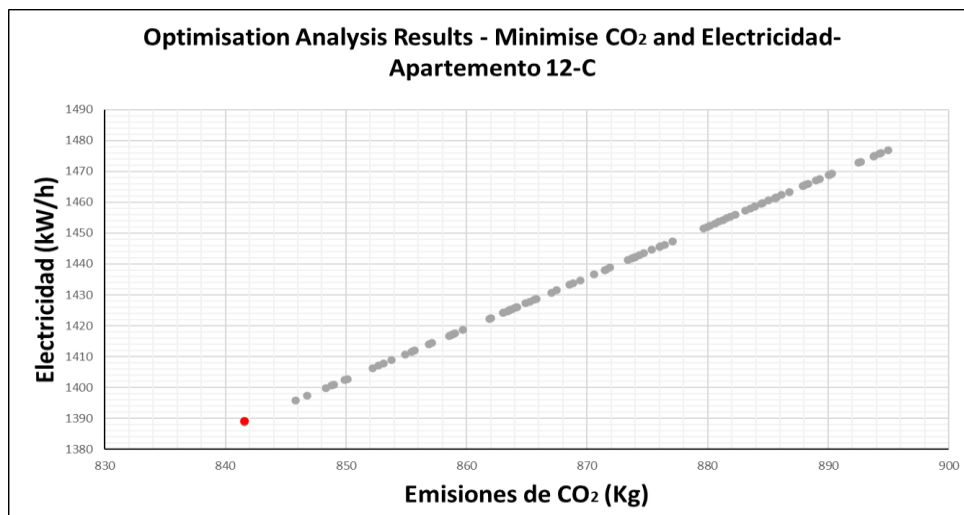
Gráfica solución de Pareto apartamento 1-B



Nota. Frente de Pareto con la solución y las posibles soluciones para mejorar el ahorro energético apartamento 1-B. Recursos propios.

Figura 7.

Gráfica solución de Pareto apartamento 12-C



Nota. Frente de Pareto con la solución y las posibles soluciones para mejorar el ahorro energético apartamento 12-C. Recursos propios.

En la Tabla 14 se muestra una comparativa de los parámetros que presentaba el modelo y las configuraciones encontradas.

Tabla 14.

Comparativa configuración actual y configuración obtenida con HVAC en (kW/h)

Tiempo	Apto 1-B (actual)	Apto 1-B (obtenida)	Apto 12-C (actual)	Apto 1-B (obtenida)
1 año	1996,07	1138,33	2032,36	1388,78
% ahorro	-	43%	-	31,7%

Nota. Consumo de energía eléctrica con HVAC actual y obtenido mediante el módulo de optimización. Recursos propios

Los parámetros de diseño que generan el mayor ahorro energético (Pareto), los que generan mayor consumo de energía y la configuración original que presentaban los apartamentos 1-B y 12-C, se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15.

Comparativa de consumo de energía respecto a la variación de los parámetros

Parámetro	Apto 1-B			Apto 12-C		
	Mayor consumo	Consumo actual	Menor Consumo (Pareto)	Mayor consumo	Consumo actual	Menor Consumo (Pareto)
COP del sistema de refrigeración	2,75	2,44	3,95	2,65	2,44	4,95
Densidad de potencia iluminación (W/m ²)	5,2	2,84	2,2	3	2,84	2,8
Densidad de potencia misceláneos (W/m ²)	17	10,73	9	17,8	10,73	9
Densidad de potencia de equipos (W/m ²)	3,25	0,27	0,25	3,25	0,27	0,25
Densidad de ocupación (W/m ²)	0,04	0,05	0,06	0,07	0,05	0,04
Set point de temperatura (°C)	25	25	27,5	24,1	25	27,7
Rotación del edificio (°)	35	270	90	160	270	90
Abertura ventana %	23	5	14	12	5	25
Muros exteriores U (W/m ² k)	1,411	1,411	0,513	1,95	1,411	1,95
ACR Ug (W/m ² k)	1,96	1,96	5,214	5,751	1,96	5,214
ACR Factor solar g (SHGC)	0,691	0,691	0,299	0,387	0,691	0,299
ACR Transmitancia luminosa %	0,744	0,744	0,209	0,278	0,744	0,209
Total, electricidad (kWh)	3722,88	1996,07	1138,33	3894,48	2032,36	1388,78

Nota. Consumo de energía eléctrica con respecto a la configuración de parámetros. Recursos propios.

3.6 Análisis de correlación Python

Para este apartado, se realizó en la herramienta gratuita Python un análisis de correlación, el cual es una técnica estadística que se implementa en el análisis de dos o más variables cuantitativas. Para el estudio de eficiencia energética, este análisis posibilita la identificación de diferentes variables que influyen en el consumo de energía y la detección patrones que ayudan a mejorar el diseño y desempeño energético de una edificación. Con el fin de facilitar la toma de decisiones de diseño y operación frente a las medidas para el ahorro energético.

En este estudio se utilizó para calcular la correlación entre variables el método de Pearson, este emplea un coeficiente denominado “r” tiene una variación entre -1 y 1 indicando que: El coeficiente cercano a (1) tiene una fuerte relación positiva entre variables, (-1) una fuerte relación

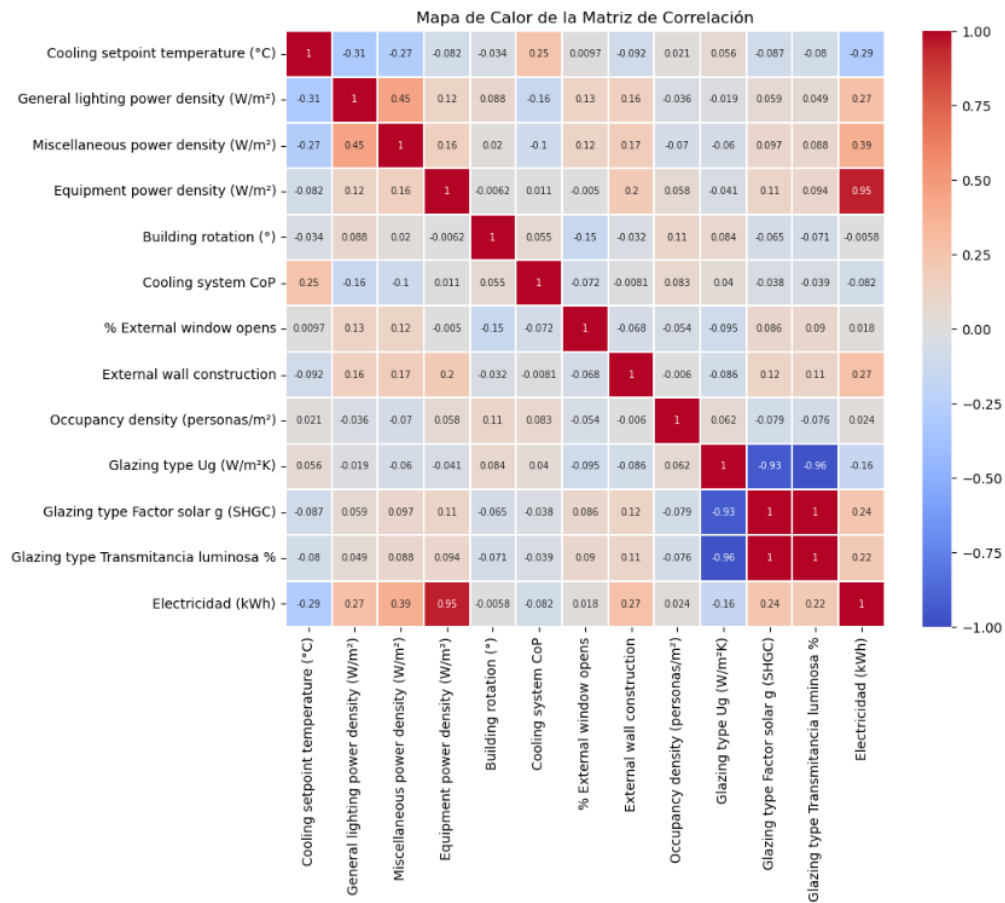
negativa entre variables y (0) cuando estas variables no están correlacionadas linealmente. Para realizar este proceso fue necesario tener en cuenta tres pasos fundamentales 1. Los datos estuvieran distribuidos uniformemente, 2. Se encontrarán relacionados linealmente y 3. Que fueran variables numéricamente continuas.

Para este análisis se diseñó un algoritmo en Python. Cuatro librerías fueron empleadas: 1. Pandas (datos estructurados y series temporales) 2. Numpy (grandes arreglos “matrices multidimensionales” amplia colección de funciones matemáticas) 3. Matplotlib (visualización de datos, creación de graficas” líneas, barras, dispersión e histogramas” pueden ser “estáticos, animados e interactivos” personalización “etiquetas, colores, tamaño y algunos códigos para el color deseado) y 4. Seaborn (visualización de datos basada en matplotlib “creación de gráficos estadísticos” mapas de calor). También se usó la función de correlación de Pearson ya predefinida en este lenguaje de programación.

La matriz de correlación de variables se generó con respecto a CO₂, electricidad y discomfort. El código de programación utilizado se presenta en el Apéndice K. Las Figura 8 y Figura 9 presenta la matriz de correlación de variables del consumo energético para cada apartamento analizado. Las matrices que tenían por objetivo analizar las emisiones de CO₂ y discomfort térmico están en el Apéndice L. En cuanto al número de muestras que se consideraron para realizar el análisis de las matrices de correlación fueron 622 para la matriz del apartamento 1-B y para el apartamento 12-C fueron 640 iteraciones.

Figura 8

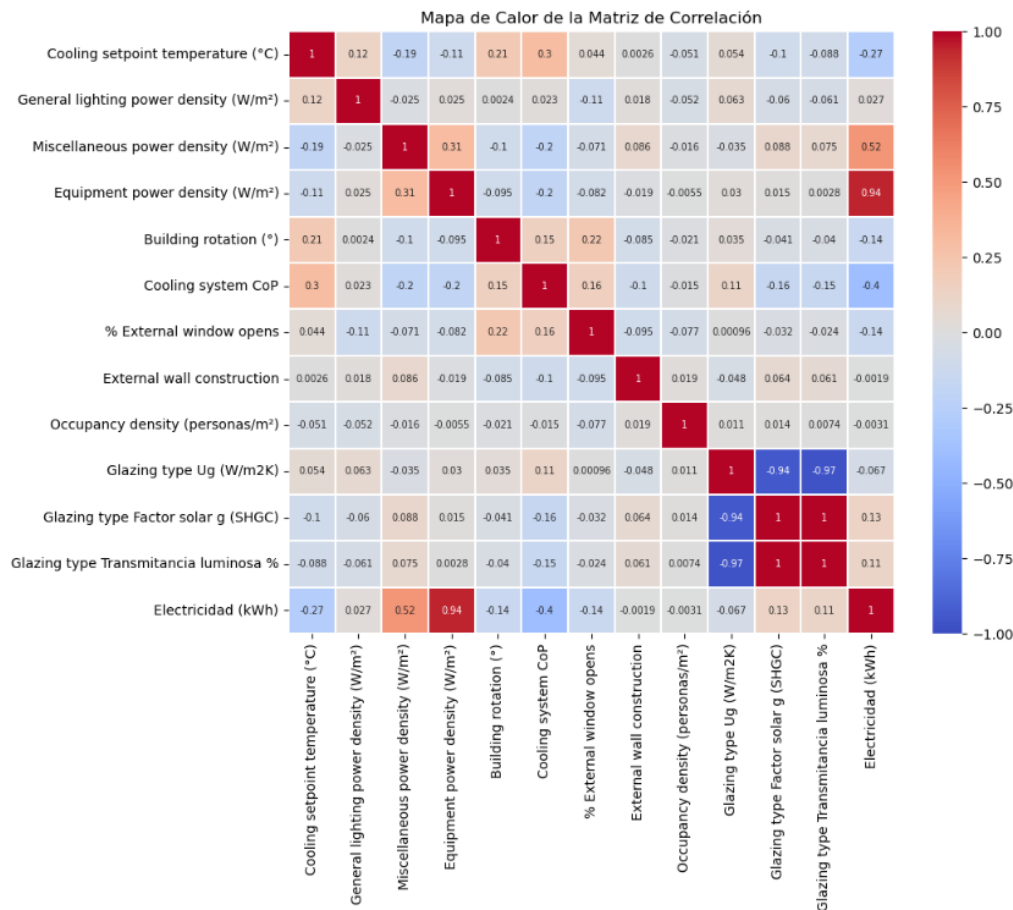
Matriz de correlación de variables Electricidad apartamento (1-B)



Nota. Matriz de correlación de variables realizada en Python para el apartamento (1-B). Recursos propios.

Figura 9

Matriz de correlación de variables Electricidad apartamento (12-C)



Nota. Matriz de correlación de variables realizada en Python para el apartamento (12-C). Recursos propios.

Las matrices de correlación muestran que, para el apartamento 1-B, las variables que incrementan el consumo energético con una correlación positiva incluyen la densidad de potencia de equipos ($r = 0,95$), misceláneos ($r = 0,39$), iluminación ($r = 0,27$), los muros exteriores U ($r = 0,27$), el factor solar g ($r = 0,24$) y la transmitancia luminosa % ($r = 0,22$) del acristalamiento. Un coeficiente de correlación cercano a 1 indica que a medida que aumenta el valor de estas variables, el consumo energético también se incrementa significativamente. Por el contrario, el set point de temperatura ($r = -0,29$), el COP del sistema de refrigeración ($r = -0,082$) y el acristalamiento Ug (r

= -0,16) presentan una correlación negativa. Esto sugiere que, al mejorar estos parámetros, el consumo energético tiende a disminuir. Un valor cercano a -1 denota una relación inversa fuerte, donde una mejora en estas variables asocia con una reducción notable en el consumo energético. Finalmente, un coeficiente de evaluación de 0 indica que no existe relación entre las variables, lo que implica que estas no influyen de manera predecible en el consumo energético

Así mismo, para el apartamento 12-C las variables de mayor impacto en el aumento del consumo energético con una correlación positiva son la densidad de potencia de equipos ($r = 0,94$), misceláneos ($r = 0,52$), el factor solar g ($r = 0,13$) y la transmitancia luminosa ($r = 0,11$). En cuanto al set point de temperatura ($r = -0,27$), el COP del sistema de refrigeración ($r = -0,4$), la rotación del edificio ($r = -0,14$), y la abertura de ventanas ($r = -0,14$) con una correlación negativa indican que mejoras en estos factores reducen el consumo energético, mientras que la densidad de potencia iluminación, ocupación, muros exteriores U y el acristalamiento U_g no impactan considerablemente siendo cercano a cero (0).

La correlación con respecto al consumo de electricidad se muestra en la Tabla 16 para los dos apartamentos objeto de estudio.

Tabla 16.*Correlación de variables de Pearson*

Parámetro	Apto 1-B	Apto 12-C
	<i>r</i>	<i>r</i>
Set point de temperatura (°C)	-0,29	-0,27
Densidad de potencia iluminación (W/m ²)	0,27	0,027
Densidad de potencia misceláneos (W/m ²)	0,39	0,52
Densidad de potencia de equipos (W/m ²)	0,95	0,94
Rotación del edificio (°)	-0,0058	-0,14
COP del sistema de refrigeración	-0,082	-0,4
Abertura ventana %	0,018	-0,14
Muros exteriores U (W/m ² k)	0,27	-0,0019
Densidad de ocupación (W/m ²)	0,024	-0,0031
ACR Ug (W/m ² k)	-0,16	-0,067
ACR Factor solar g (SHGC)	0,24	0,13
ACR Transmitancia luminosa %	0,22	0,11

Nota. Correlación de variables en los aptos 1-B y 12-C con respecto al consumo energético.

Recursos propios.

4. Conclusiones

Según la revisión de literatura sobre estudios de evaluación de parámetros con incidencia en el consumo energético de edificaciones, el 65% de los artículos de la muestra considerada utiliza para sus análisis herramientas de software como DesignBuilder y EnergyPlus, mientras que el 35% restante de los artículos utiliza herramientas como IDA-ICE, ECOTECT, Fortran 77 y Python.

Del total de los 20 artículos considerados en la muestra el 60% están enfocados en viviendas en multifamiliares el 35% en viviendas unifamiliares y el 20% en otro tipo de edificaciones como escolares, comerciales y hospitales.

Los parámetros de mayor impacto en los documentos consultados para clima cálido tropical, están enfocados en parámetros constructivos como el tipo de acristalamiento, y los tipos de muros exteriores. La literatura también muestra como relevantes parámetros como el set point de temperatura, el coeficiente de rendimiento COP del sistema de aire acondicionado, y las densidades de potencia eléctrica asociadas a diferentes usos dentro de las edificaciones.

En cuanto a la configuración de las simulaciones, se observó que el enfoque de modelado bajo una única zona térmica puede reducir significativamente los tiempos de simulación. Para el estudio de los parámetros que afectan el consumo de energía eléctrica de un apartamento, la agrupación de las cargas internas, puede facilitar el análisis de parámetros eléctricos.

El módulo de optimización de DesignBuilder permite realizar el análisis de parámetros que afectan el consumo de energía eléctrica de una manera más eficiente encontrando soluciones optimas en el mismo programa sin tener que exportar los datos a otras herramientas.

El mayor ahorro energético que se obtuvo fue de 1138,33 kW/h bajo la configuración en la que los parámetros seleccionados presentan los siguientes valores: COP '3,95', potencia

iluminación '2,2 (W/m²)', potencia misceláneos '9 (W/m²)', potencia de equipos '0,25 (W/m²)', densidad de ocupación '0,06 (W/m²)', Set point de temperatura (°C) '27,5', rotación del edificio '90°', % de abertura ventana '14', Muros exteriores (U) '0,513 (W/m²k)', ACR Ug (W/m²k) '5,214', ACR Factor solar g (SHGC) '0,299' y ACR Transmitancia luminosa % '0,209' que es un ahorro del 69,4% en representación con el escenario de mayor consumo el cual tiene un consumo de 3722,88 kW/h y un 42,98% con respecto al escenario real el cual tiene un consumo de 1996,07 kW/h. Estos resultados son válidos para apartamentos con áreas similares pertenecientes al mismo grupo socioeconómico.

Se pudo encontrar a través del análisis de correlación de variables, que la densidad de potencia de equipos es la variable con mayor influencia sobre el consumo de energía eléctrica del apartamento. Otras densidades como la potencia de iluminación y misceláneos también presentan una influencia clara. En relación a las variables no asociadas al sistema eléctrico, se encontró que el valor U de los muros exteriores y la cubierta, así como el factor solar (SHGC) y transmitancia luminosa de las ventanas tienen una mayor influencia sobre el consumo energético de los apartamentos que presentan una mayor exposición a la radiación solar directa.

5. Recomendaciones

Se recomienda para maximizar el ahorro energético, utilizar sistemas de aire acondicionado y electrodomésticos de alta eficiencia energética. También se propone explorar la integración de fuentes de energía renovable, como paneles solares, que permitan reducir el consumo energético.

En cuanto al uso de herramientas como DesignBuilder o Energy Plus, es recomendable hacer uso de estas en las etapas de diseño de edificaciones para evaluar los parámetros que influyen en el desempeño energético, obteniendo datos que faciliten evaluar y optimizar el consumo de energía eléctrica.

En posteriores investigaciones se sugiere considerar otras tipologías de apartamentos y utilizar equipos con mayores capacidades de cómputo que permitan el análisis de una mayor cantidad de parámetros, con la finalidad que en climas cálidos tropicales se tomen medidas en cuanto al aumento de la demanda energética y al cambio climático.

Referencias Bibliográficas

- Abden, M. J., Tao, Z., Alim, M. A., Pan, Z., George, L., & Wuhrer, R. (2022). Combined use of phase change material and thermal insulation to improve energy efficiency of residential buildings. *Journal of Energy Storage*, 56. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105880>
- Araújo, G. R., Gomes, R., Ferrão, P., & Gomes, M. G. (2024). Optimizing building retrofit through data analytics: A study of multi-objective optimization and surrogate models derived from energy performance certificates: Optimizing building retrofit through data analytics. *Energy and Built Environment*, 5(6), 889-899. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2023.07.002>
- Attia, M. M., Elboshy, B., Mohamed, A. S., Eita, M. A., & Shakra, K. E. (2024). Improving the energy efficiency performance of residential buildings in hot arid regions using lightweight concrete bricks. *Case Studies in Construction Materials*, 21. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03474>
- Baba, F. M., Ge, H., Zmeureanu, R., & Wang, L. (Leon). (2023). Optimizing overheating, lighting, and heating energy performances in Canadian school for climate change adaptation: Sensitivity analysis and multi-objective optimization methodology. *Building and Environment*, 237. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110336>
- Bashir, F. M., Dodo, Y. A., Mohamed, M. A. said, Norwawi, N. M., Shannan, N. M., & Afghan, A. A. (2024). Effects of natural light on improving the lighting and energy efficiency of buildings: toward low energy consumption and CO2 emission. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 19, 296-305. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctad130>

- Bichiou, Y., & Krarti, M. (2011). Optimization of envelope and HVAC systems selection for residential buildings. *Energy and Buildings*, 43(12), 3373-3382. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.08.031>
- Brea, F., Silva, A. S., Ghisi, E., & Fachinotti, V. D. (2016). Residential building design optimisation using sensitivity analysis and genetic algorithm. *Energy and Buildings*, 133, 853-866. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.025>
- Cárdenas, J. (2017). *Herramienta metodológica para el análisis eficiente de simulaciones energéticas de edificaciones en el trópico.*
- Cárdenas, J., Jaramillo, J., & Osma, 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. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104402>
- Challenger S.A.S. (s. f.). *Manual aire acondicionado.*
- Chel, A., & Kaushik, G. (2018). Renewable energy technologies for sustainable development of energy efficient building. *Alexandria Engineering Journal*, 57(2), 655-669. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.02.027>
- Chen, Y., & Hong, T. (2018). Impacts of building geometry modeling methods on the simulation results of urban building energy models. *Applied Energy*, 215, 717-735. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.073>
- Crawley, D. B., Hand, J. W., Kummert, M., & Griffith, B. T. (2008). Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. *Building and Environment*, 43(4), 661-673. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.027>

- Crawley, D. B., Lawrie, L. K., Winkelmann, F. C., & Pedersen, C. O. (2001). *EnergyPlus: New Capabilities in a Whole-Building Energy Simulation Program*.
<https://www.researchgate.net/publication/242075033>
- Del Ama, F., Moreno, B., & Montero, M. (2023). Assessment of Building Energy Simulation Tools to Predict Heating and Cooling Energy Consumption at Early Design Stages. *Sustainability (Switzerland)*, 15(3). <https://doi.org/10.3390/su15031920>
- De León, L., Mora, D., Carpino, C., Arcuri, N., & Chen Austin, M. (2023). A Reference Framework for Zero Energy Districts in Panama Based on Energy Performance Simulations and Bioclimatic Design Methodology. *Buildings*, 13(2).
<https://doi.org/10.3390/buildings13020315>
- Departamento Nacional de Planeación. (2023). *Colombia, potencia mundial de la vida - Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026*.
<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Publicaciones/plan-nacional-de-desarrollo-2022-2026-colombia-potencia-mundial-de-la-vida.pdf>
- DesignBuilder Software Ltd. (s. f.). *DesignBuilder*. Optimización de DesignBuilder.
- Dodoo, A., & Ayarkwa, J. (2019). Effects of climate change for thermal comfort and energy performance of residential buildings in a Sub-Saharan African climate. *Buildings*, 9(10).
<https://doi.org/10.3390/buildings9100215>
- Dutta, A., Samanta, A., & Neogi, S. (2017). Influence of orientation and the impact of external window shading on building thermal performance in tropical climate. *Energy and Buildings*, 139, 680-689. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.018>

- 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>
- Fumo, N. (2014). A review on the basics of building energy estimation. En *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 31, pp. 53-60). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.040>
- Gao, H., Koch, C., & Wu, Y. (2019). Building information modelling based building energy modelling: A review. En *Applied Energy* (Vol. 238, pp. 320-343). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.032>
- Gou, S., Nik, V. M., Scartezzini, J. L., Zhao, Q., & Li, Z. (2018). Passive design optimization of newly-built residential buildings in Shanghai for improving indoor thermal comfort while reducing building energy demand. *Energy and Buildings*, 169, 484-506. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.095>
- Harish, V. S. K. V., & Kumar, A. (2016). A review on modeling and simulation of building energy systems. En *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 56, pp. 1272-1292). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.040>
- Harvey, L. D. D. (2009). Reducing energy use in the buildings sector: Measures, costs, and examples. En *Energy Efficiency* (Vol. 2, Número 2, pp. 139-163). <https://doi.org/10.1007/s12053-009-9041-2>
- Hensen, J. L. M., & Lamberts, R. (2019). *Building Performance Simulation for Design and Operation*. <https://lccn.loc.gov/2018051032>
- Hernández, J. (s. f.). *Energy consumption and associated emissions of residential sector Consumo energético y emisiones asociadas del sector residencial*.

- Ihm, P., & Krarti, M. (2012). Design optimization of energy efficient residential buildings in Tunisia. *Building and Environment*, 58, 81-90.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.06.012>
- Ioannou, A., & Itard, L. C. M. (2015). Energy performance and comfort in residential buildings: Sensitivity for building parameters and occupancy. *Energy and Buildings*, 92, 216-233.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.01.055>
- Kim, K. H., Kie-Whan Oh, J., & Jeong, W. S. (2016). Study on solar radiation models in South Korea for improving office building energy performance analysis. *Sustainability (Switzerland)*, 8(6). <https://doi.org/10.3390/su8060589>
- Lai, X., Meng, Z., Wang, S., Han, X., Zhou, L., Sun, T., Li, X., Wang, X., Ma, Y., & Zheng, Y. (2021). Global parametric sensitivity analysis of equivalent circuit model based on Sobol' method for lithium-ion batteries in electric vehicles. *Journal of Cleaner Production*, 294.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126246>
- Latha, H., Patil, S., & Kini, P. G. (2023). Influence of architectural space layout and building perimeter on the energy performance of buildings: A systematic literature review. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 14(3), 431-474.
<https://doi.org/10.1007/s40095-022-00522-4>
- Lin, Y., Huang, T., Yang, W., Hu, X., & Li, C. (2023). A Review on the Impact of Outdoor Environment on Indoor Thermal Environment. En *Buildings* (Vol. 13, Número 10). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI).
<https://doi.org/10.3390/buildings13102600>

- Lozano, R., & Paul, C. (2010). «*Aplicacion de sistemas de ventilacion natural para el confort térmico de las habitaciones en un conjunto de viviendas multifamiliares- distrito de pfchanaki*».
- Mauthe, F., Ballarini, I., De Luca, G., Tootkaboni, M. P., & Corrado, V. (2020). Sensitivity Analysis of the Thermal Energy Need of a Residential Building Assessed by means of the en ISO 52016 Simplified Dynamic Method. *E3S Web of Conferences*, 197. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019702012>
- Mesa, D., Lotero, M., Jaramillo, C., Escobar, L., González, O., Camacho, G., García, J., Martínez, W., Báez, O., Martínez, J., Rojas, M., Montaña, D., Florez, E., Ortiz, V., Ramirez, E., Valencia, A., & Contreras, A. (s. f.). *Plan de Acción Indicativo PROURE - Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía*. Recuperado 17 de julio de 2024, de https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/PROURE/Documento_PROURE_2022-2030_v4.pdf
- Neale, J., Shamsi, M. H., Mangina, E., Finn, D., & O'Donnell, J. (2022). Accurate identification of influential building parameters through an integration of global sensitivity and feature selection techniques. *Applied Energy*, 315. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118956>
- Obaid, M., & Akkoyunlu, M. (2022). Building Energy Modelling Review. En *J. Int. Environmental Application & Science* (Vol. 17, Número 4).
- Ordoñez, A. (2017). *Manual de ayuda DesignBuilder en español*.
- Pan, Y., Zhu, M., Lv, Y., Yang, Y., Liang, Y., Yin, R., Yang, Y., Jia, X., Wang, X., Zeng, F., Huang, S., Hou, D., Xu, L., Yin, R., & Yuan, X. (2023). Building energy simulation and its application for building performance optimization: A review of methods, tools, and case

- studies. En *Advances in Applied Energy* (Vol. 10). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.adapen.2023.100135>
- Pathirana, S., Halwatura, R., & Rodrigo, A. (2020). Sustainable approach to energy rating system for residential buildings. *Asian Journal of Civil Engineering*, 21(8), 1331-1342.
<https://doi.org/10.1007/s42107-020-00280-w>
- Pathirana, S., Rodrigo, A., & Halwatura, R. (2019). Effect of building shape, orientation, window to wall ratios and zones on energy efficiency and thermal comfort of naturally ventilated houses in tropical climate. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 10(1), 107-120. <https://doi.org/10.1007/s40095-018-0295-3>
- Raftery, P., Keane, M., & O'Donnell, J. (2011). Calibrating whole building energy models: An evidence-based methodology. *Energy and Buildings*, 43(9), 2356-2364.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.05.020>
- Rallapalli, H. S., Bryan, H., Addison, M., & Reddy, T. A. (2010). *A Comparison of EnergyPlus and eQUEST Whole Building Energy Simulation Results for a Medium Sized Office Building*.
- Resolución 0549 de 2015. (2015). <https://ismd.com.co/wp-content/uploads/2017/03/Resoluci%C3%B3n-549-de-2015.pdf>
- Santos, J., Abel Rivera Flórez, G., Cárdenas Santamaría, M., Carlos Villegas Echeverri, L., Guillermo Zuluaga Cardona, J., Gaviria Uribe, A., Janeth Restrepo Gallego, G., Arce Zapata, G., Lorena Gutiérrez Botero, M., Giha Tovar, Y., Gilberto Murillo Urrutia, L., Armando Sánchez Ortega, C., Luna Sánchez, D., Cardona Gutiérrez, G., Garcés Córdoba, M., Raúl Roys Garzón, N., Fernando Mejía Alzate, L., Corchuelo Marmolejo, A., & Matallana Méndez, S. (2018). *Consejo nacional de política económica y Social CONPES*

3919 política nacional de edificaciones sostenibles.

<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3919.pdf>

Shahee, A., Abdoos, M., Aslani, A., & Zahedi, R. (2024). Reducing the energy consumption of buildings by implementing insulation scenarios and using renewable energies. *Energy Informatics*, 7(1). <https://doi.org/10.1186/s42162-024-00311-9>

UIS – MINCIENCIAS –UPME. (2021). *Lineamientos técnicos para el sistema de etiquetado energético de edificaciones de Colombia*.

UNEP. (2024). *2023 Global Status Report for Buildings and Construction: Beyond foundations - Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector*. United Nations Environment Programme. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/45095>

Utama, A., & Gheewala, S. H. (2009). Indonesian residential high rise buildings: A life cycle energy assessment. *Energy and Buildings*, 41(11), 1263-1268. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.07.025>

Vérez, D., Borri, E., & Cabeza, L. F. (2022). Trends in Research on Energy Efficiency in Appliances and Correlations with Energy Policies. *Energies*, 15(9). <https://doi.org/10.3390/en15093047>

Vila, R., Torrado, M., & Reguant, M. (2019). Análisis de regresión lineal múltiple con SPSS: un ejemplo práctico. *REIRE Revista d Innovació i Recerca en Educació*, 12 (2). <https://doi.org/10.1344/reire2019.12.222704>

Vukadinović, A., Radosavljević, J., Đorđević, A., Protić, M., & Petrović, N. (2021). Multi-objective optimization of energy performance for a detached residential building with a sunspace using the NSGA-II genetic algorithm. *Solar Energy*, 224, 1426-1444. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.06.082>

- Wang, C., Peng, M., & Xia, G. (2020). Sensitivity analysis based on Morris method of passive system performance under ocean conditions. *Annals of Nuclear Energy*, 137. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2019.107067>
- Wang, H., & Chen, Q. (2014). Impact of climate change heating and cooling energy use in buildings in the United States. *Energy and Buildings*, 82, 428-436. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.034>
- Weekes, D., Lapotaire, J. P., Persily, A., Siegel, J., Stephens, B., Walker, I., Wargocki, P., Lyngby, K., Bruce White, D., & Conlan, W. (2020). *MIEMBROS DEL COMITÉ «Cognizant Committee»*. www.ashrae.org.
- Wei, T. (2013). A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis. En *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 20, pp. 411-419). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.014>
- Yang, J., Fu, H., & Qin, M. (2015). Evaluation of Different Thermal Models in EnergyPlus for Calculating Moisture Effects on Building Energy Consumption in Different Climate Conditions. *Procedia Engineering*, 121, 1635-1641. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.09.194>

Apéndices

Apéndice A. Paso a paso simulación paramétrica (módulo de optimización)

Tabla 17

Paso a paso simulación paramétrica (módulo de optimización)

Paso	Descripción
1. Crear modelo base	<p>a. Crear un nuevo archivo: Abrir DesignBuilder y crear un nuevo archivo de proyecto.</p> <p>b. Definir ubicación y condiciones climáticas: Seleccionar la ubicación geográfica del proyecto (datos climáticos específicos del lugar donde se ubica el edificio).</p> <p>c. Crear la edificación: Añadir un bloque rectangular con dimensiones de acuerdo a las especificaciones del proyecto (edificios multifamiliares, viviendas unifamiliares, entre otros).</p> <p>d. Configuración del sistema HVAC: Utilizar las opciones predeterminadas de DesignBuilder para el sistema HVAC, seleccionando un sistema que incluya calefacción y refrigeración.</p>
2. Ejecutar simulación estándar	<p>a. Realizar una simulación base: Dirigirse a la pestaña "Simulación" y ejecutar una simulación anual estándar.</p> <p>b. Seleccionar resultados: Escoger resultados por hora, mensuales o los que se consideren necesario para la optimización posterior.</p> <p>c. Verificación de resultados: Revisar los resultados del modelo, compruebe que se comporta de manera correcta. De no ser así, se debe corregir el error y volver a simular hasta que los resultados sean óptimos.</p>
3. Definir problema de optimización	<p>a. Acceder a la pestaña de optimización: "Optimización + UA/SA" en la pantalla de simulación. Para configurar el análisis de optimización se debe definir los objetivos de optimización, como minimizar las emisiones de CO₂ y reducir la incomodidad térmica.</p> <p>b. Establecer las variables de diseño: configurar las variables que se optimizarán, como relación ventana-pared (WWR), temperaturas de consigna para calefacción y refrigeración. Ajustar los rangos según las necesidades del proyecto.</p>
4. Configurar opciones de cálculo	<p>a. Ajustar las opciones de cálculo: Abrir el cuadro de diálogo con las opciones para el cálculo de optimización y ajuste el tamaño de la población inicial a un valor adecuado (por ejemplo, 10 para un análisis pequeño).</p> <p>b. Confirmar la configuración: Revisar las opciones y verificar que están configuradas correctamente.</p>
5. Iniciar análisis de optimización	<p>a. Iniciar la optimización: Presione el botón "Iniciar" para comenzar el proceso de optimización.</p> <p>b. Monitorear el progreso: Durante la optimización, observe el proceso para identificar cuándo se logra la convergencia. Puede detenerse manualmente si se considera que los resultados ya son adecuados.</p>
6. Análisis de resultados	<p>a. Revisar el frente de Pareto: Utilizando las herramientas de análisis de DesignBuilder para investigar las configuraciones óptimas. Ordenar los resultados por incomodidad o emisiones de CO₂, según sea necesario.</p> <p>b. Identificar configuraciones óptimas: Analizar las configuraciones que logran los objetivos de diseño, como minimizar el carbono y la incomodidad térmica.</p> <p>c. Seleccionar el punto de equilibrio: Elegir una configuración en el frente de Pareto que ofrezca un equilibrio adecuado entre los diferentes objetivos de optimización.</p>

Nota. Pasos para realizar la simulación paramétrica en DesignBuilder. (*Tutorial Básico de Optimización*, n.d.).

Apéndice B: Tabla de horario de ocupación**Tabla 18***Horario uso luminarias LED apartamento*

Días uso entre semana	Uso entre semana	%	Días uso fin de semana	Uso fin de semana	%
	5:00 AM – 6:00 AM	20%		5:00 AM – 6:00 AM	20%
5	7:00 PM – 10:00 PM	20%	2	7:00 PM – 10:00 PM	20%

Nota. Horario de ocupación y encendido de luminarias en un apartamento. Adaptado de (UIS –

MINCIENCIAS –UPME, 2021)

Apéndice C. Tablas de cerramientos**Tabla 19***Cubierta plana*

N° Capa	Material	Espesor (m)	U (W/m ² K)
1	Manto asfáltico	0,004	
2	Floor/roof screed	0,05	
3	Cast concrete	0,1	2,769
4	Yeso gypsum plasterboard	0,002	

Nota. Especificaciones de materiales, espesor y transmitancia de la cubierta plana. Adaptado de (UIS – MINCIENCIAS –UPME, 2021)

Tabla 2*Entrepiso*

N° Capa	Material	Espesor (m)	U (W/m ² K)
1	Ceramic/clay tiles – ceramic floor tiles dry	0,006	
2	Cement/plaster/mortar – cement screed	0,004	
3	Floor/roof screed	0,06	1,92
4	Cast concrete	0,1	
5	Estuco plástico plastering	0,002	

Nota. Especificaciones de materiales, espesor y transmitancia del entrepiso. Adaptado de (UIS – MINCIENCIAS –UPME, 2021)

Tabla 3*Muros interiores*

N° Capa	Material	Espesor (m)	U (W/m ² K)
1	Manto asfáltico	0,002	
2	Floor/roof screed	0,12	2,765
3	Cast concrete	0,002	

Nota. Especificaciones de materiales, espesor y transmitancia de los muros interiores. Adaptado de (UIS – MINCIENCIAS –UPME, 2021)

Tabla 4*Muros exteriores*

N° Capa	Material	Espesor (m)	U (W/m ² K)
1	Gypsum plastering	0,005	
2	Cement/plaster/mortar – cement mortar dry	0,02	
3	Brick – aerated	0,1	1,774
4	Cement/plaster/mortar – cement mortar dry	0,02	
5	Gypsum plastering	0,002	

Nota. Especificaciones de materiales, espesor y transmitancia de los muros exteriores. Adaptado de (UIS – MINCIENCIAS –UPME, 2021)

Tabla 5*Placa de cimentación*

N° Capa	Material	Espesor (m)	U (W/m ² K)
1	Floor/roof screed	0,05	
2	Cast concrete	0,1	1,599
3	Floor/roof screed	0,05	
4	Sand and gravel	0,2	

Nota. Especificaciones de materiales, espesor y transmitancia de la placa de cimentación. Adaptado de (UIS – MINCIENCIAS –UPME, 2021)

Apéndice D. Tabla apertura de ventanas**Tabla 1***Horario de apertura de ventanas*

Días uso entre semana	Uso entre semana	%	Días uso fin de semana	Uso fin de semana	%
5	12:00 AM – 6:00 AM	30%	2	12:00 AM – 7:00 AM	30%
	6:00 AM – 5:00 PM	10%		7:00 AM – 10:00 AM	20%
	5:00 PM – 6:00 PM	20%		10:00 AM – 12:00 PM	10%
	6:00 PM – 12:00 AM	30%		2:00 PM – 4:00 PM	10%
	-	-		4:00 PM – 12:00 AM	30%

Nota. Horario semanal de la apertura para las ventanas. Adaptado de (UIS – MINCIENCIAS – UPME, 2021).

Apéndice E. Tabla cantidad de equipos y horarios de uso (ajustados)

Tabla 1

Equipos por apartamento y horario de uso “por categorías en la pestaña Actividad”

Cant.	Equipo	Categoría	Potencia (W)	Densidad de potencia (W/m ²)	Fracción radiante	Días de uso entre semana	Uso entre semana	%	Días de uso fin de semana	Uso fin de semana	%
1	Computador escritorio	Computadoras	200	3,64	0,22	5	4:00 PM - 6:00 PM	100%	1	8:00 AM – 10:00 AM	100%
1	MODEM	Equipos de oficina	15	0,27	0,10	5	24 horas	100%	2	24 horas	100%
1	Teléfono inalámbrico										
1	Nevera	Cocina	260	4,73	0,18	5	24 horas	20%	2	24 horas	20%
1	Campana extractora										
13	Led	Iluminación	156	2,84	0,17	5	5:00 AM - 6:00 AM	20%	2	5:00 AM – 6:00 AM	20%
2	Televisor	Misceláneos	710	12,91	0,27	5	7:00 AM - 10:00 AM	70%	2	8:00 AM - 10:00 AM	100%
2	Ventilador										
1	Lavadora										

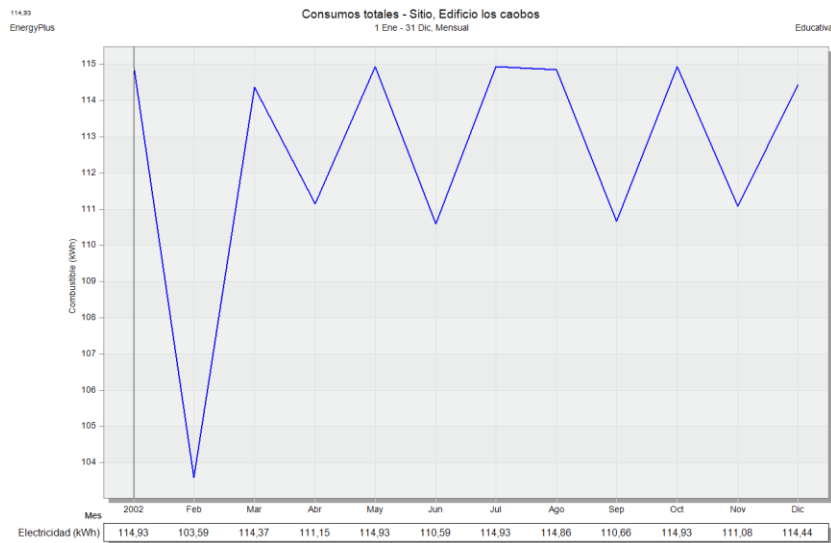
Nota. Cantidad de equipos por apartamento y horarios de uso semanal con ajustes para las categorías con respecto a la fracción radiante, potencia total, densidad de potencia y % de uso. Adaptado de (UIS – MINCIENCIAS –UPME, 2021).

Para ajustar el modelo, en cuanto a la densidad de potencia (W/m²) se realizó el cálculo mediante la división de la potencia en (W) de la categoría sobre el área de la vivienda que es de 55 m². Así mismo, la programación utilizada para cada categoría se configuro de la siguiente manera: para la categoría de “Computadoras” se utilizó la programación de ‘Computador escritorio’, para “Equipos de oficina” la programación de ‘MODEM de internet’, para “Cocina” la programación de ‘Nevera’, para “Iluminación” la programación de ‘Led tipo 2’ y para “Misceláneos” la programación de ‘Televisor’.

Apéndice F. Gráficas y tablas de simulaciones en DesignBuilder para los tres apartamentos

Figura 1

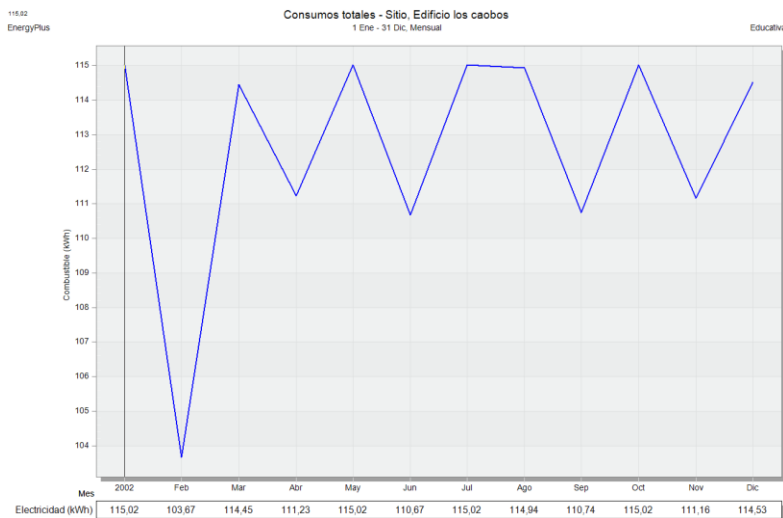
Consumo energético apartamento 1-B



Nota. Consumo de energía mensual para un año del apto 1-B. Tomado de DesignBuilder

Figura 2

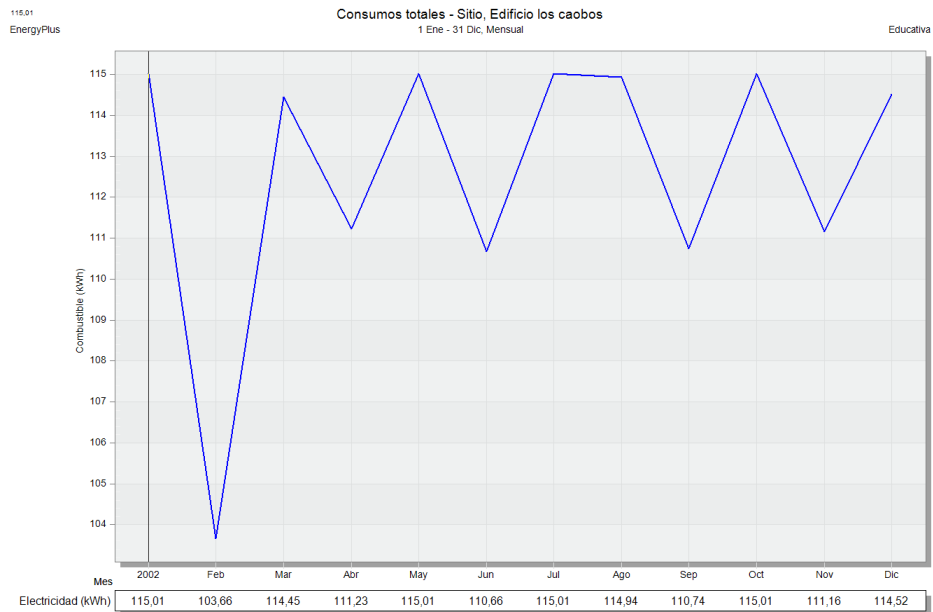
Consumo energético apartamento 6-A



Nota. Consumo de energía mensual para un año del apto 1-B. Tomado de DesignBuilder

Figura 3

Consumo energético apartamento 12-C



Nota. Consumo de energía mensual para un año del apto 1-B. Tomado de DesignBuilder

Apéndice G. Plantillas tipo de acristalamiento y muros exteriores.

Figura 1

Tipo de acristalamiento

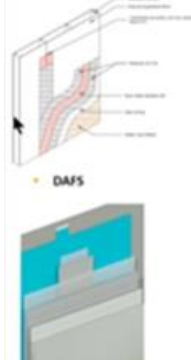
Monolítico 4mm	Transmitancia Luminosa (%)	Factor Solar g (SHGC)	Coefficiente de sombra (SC)	Transmitancia térmica (W/m2k) ug	Aspecto	Selectividad
Monolítico 4mm Cool-Lite ST120	20.9 %	0.299	0.344	5.214	Plata	0.7
Monolítico Bienestar Verde	27.8%	0.387	0.444	5.751	Verde	0.7

Nota. Datos para realizar la configuración de las plantillas de acristalamiento en DesignBuilder.

Adaptado de (UIS – MINCIENCIAS –UPME, 2021)

Figura 2

Muros exteriores

	LINEA BASE	PROPUESTA
	Atributos línea base	Atributos buscados SIKA PAREX- sistema WEATHER MASTER DAFS
MUROS EXTERIORES	PRODUCTO BASE / SISTEMA SIKA	
	Muro exterior predominante	El muro más el sistema
	Valor "U" Muro exterior	
	1,95	0,513

Nota. Datos para realizar la configuración de las plantillas de muros exteriores en DesignBuilder.

Adaptado de (UIS – MINCIENCIAS –UPME, 2021)

Apéndice H Tabla cantidad de equipos y horarios de uso con HVAC

Tabla 1

Equipos por apartamento y horario de uso con HVAC

Cant.	Equipo	Categoría	Potencia (W)	Densidad de potencia (w/m2)	Fracción radiante	Días de uso entre semana	Uso entre semana	%	Días de uso fin de semana	Uso fin de semana	%
1	Computador escritorio	Computadoras	200	3,64	0,22	5	4:00 PM - 6:00 PM	100%	1	8:00 AM – 10:00 AM	100%
1	MODEM	Equipos de oficina	15	0,27	0,10	5	24 horas	100%	2	24 horas	100%
1	Teléfono inalámbrico										
1	Nevera	Cocina	260	4,73	0,18	5	24 horas	20%	2	24 horas	20%
1	Campana extractora										
13	Led	Iluminación	156	2,84	0,17	5	5:00 AM - 6:00 AM	20%	2	5:00 AM – 6:00 AM	20%
2	Televisor	Misceláneos	590	10,73	0,24	5	7:00 AM - 10:00 AM	70%	2	8:00 AM - 10:00 AM	100%
1	Lavadora										
1	Aire acondicionado	HVAC	1540 y 1200	-	-	5	8:00 PM - 2:00 AM	100%	2	8:00 PM - 2:00 AM	100%

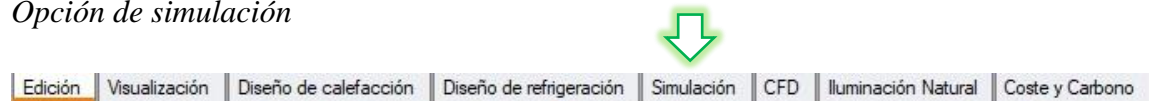
Nota. Cantidad de equipos por apartamento y horarios de uso semanal con ajustes para las categorías con respecto a la fracción radiante, potencia total, densidad de potencia y % de uso. Adaptado de (UIS – MINCIENCIAS –UPME, 2021)

Apéndice I. Paso a paso módulo de optimización DesignBuilder

Para ingresar a la interfaz del módulo de optimización se debe ir a la parte inferior de la pantalla y seleccionar la opción de simulación en DesignBuilder como se muestra en la Figura 1.

Figura 1

Opción de simulación

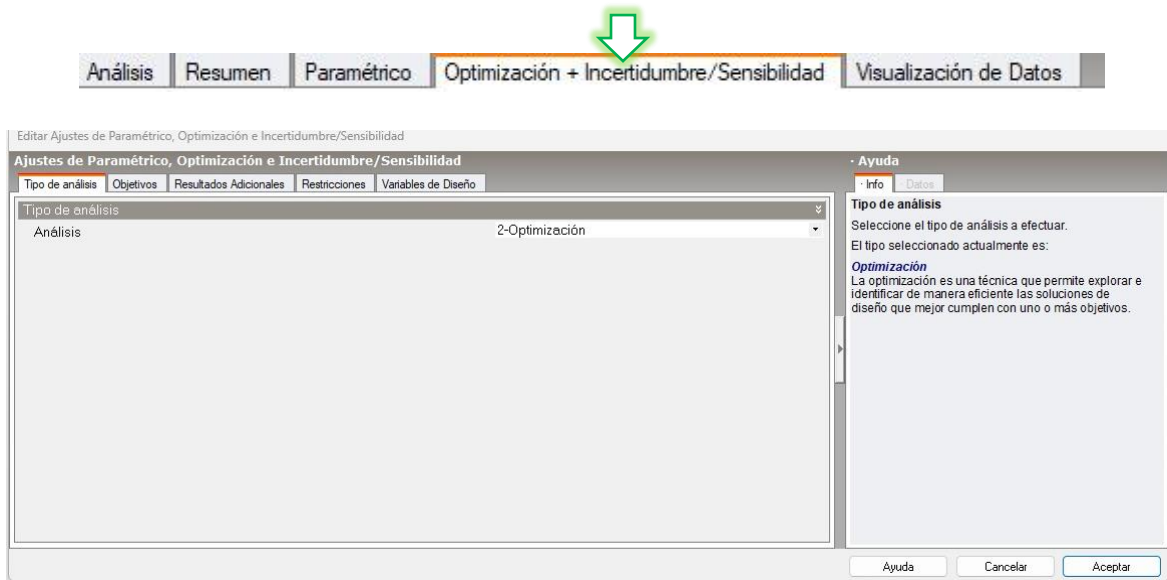


Nota. Opción para ingresar para simular en DesignBuilder. Tomado de DesignBuilder

Luego aparecerá la siguiente interfaz en la cual se elegirá la opción de Optimización + Incertidumbre/Sensibilidad, aparecerá el siguiente cuadro de dialogo Figura 2 en donde se seleccionará el tipo de análisis que se desea realizar (1- Análisis Paramétrico, 2- Optimización y 3- Incertidumbre/Sensibilidad).

Figura 2

Opciones Optimización + Incertidumbre/Sensibilidad

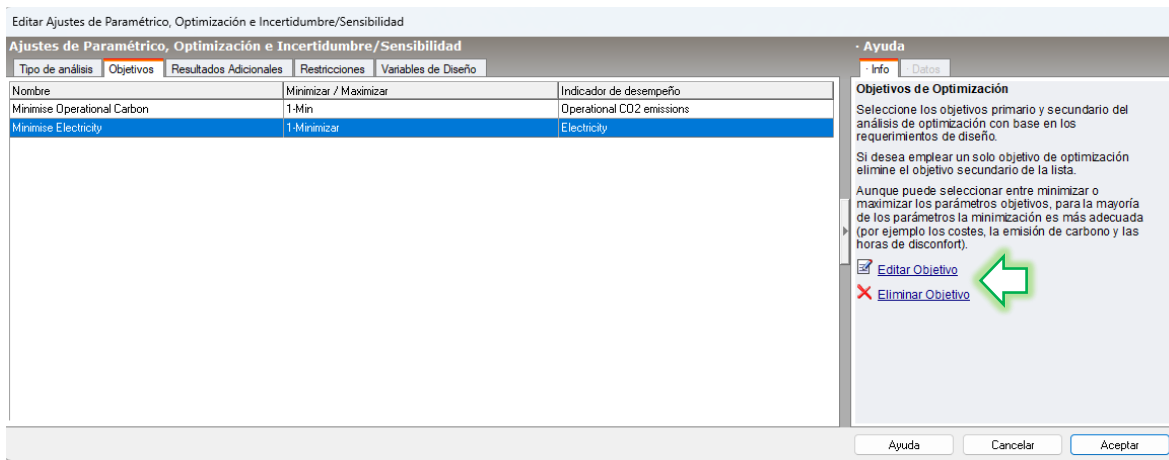


Nota. Opción para ingresar a la interfaz de *Optimización + Incertidumbre/Sensibilidad* en DesignBuilder. Tomado de DesignBuilder

En la pestaña “Objetivos” se configuran los objetivos de optimización, para este caso fueron seleccionados CO₂ y electricidad generada los cuales pueden ser modificados o eliminados con la opción editar o eliminar respectivamente de acuerdo a los requerimientos como se observa en la Figura 3.

Figura 3

Opciones Optimización + Incertidumbre/Sensibilidad

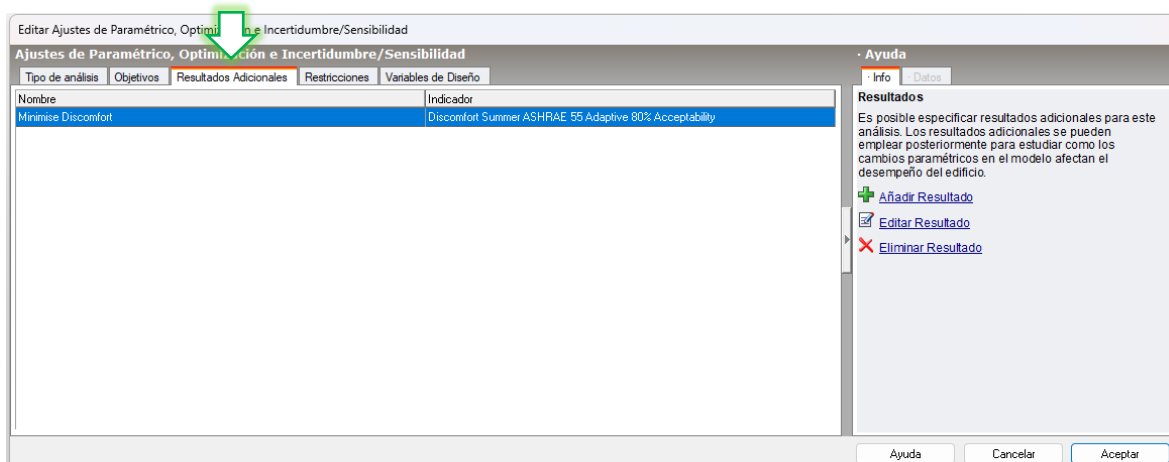


Nota. Pestaña de configuración de los Objetivos. Tomado de DesignBuilder

De ser necesario puede añadir un resultado adicional en la pestaña que lleva este mismo nombre como se observa en la Figura 4.

Figura 4

Pestaña Resultados adicionales

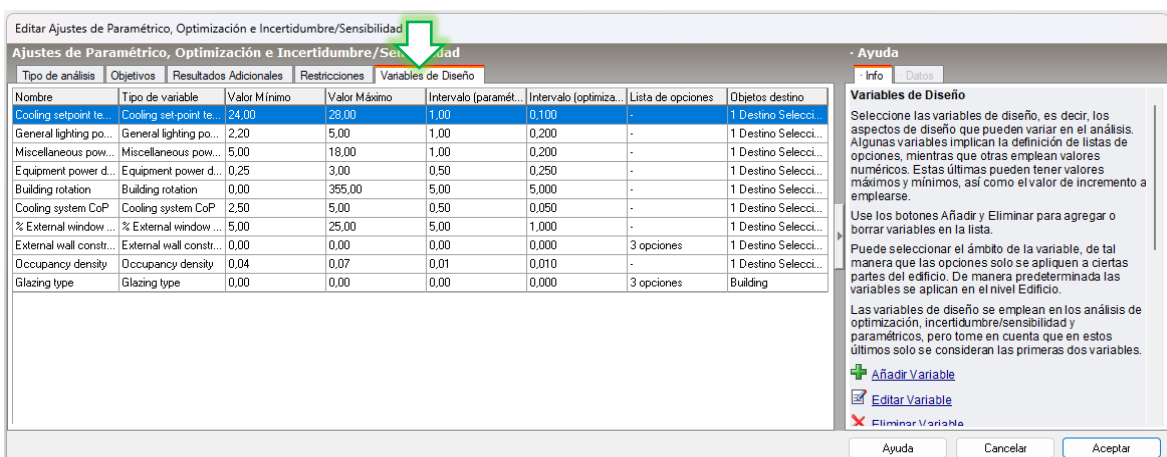


Nota. Pestaña de configuración de los Resultados adicionales. Tomado de DesignBuilder

En la pestaña “Variables de diseño” se hace la configuración de las variables objeto de análisis. Este módulo permite un máximo de 10 variables como se muestra en la Figura 5 y se pueden configurar según el tipo de variable que se necesite como se muestra en la Figura 6. Introduciendo cada una de estas individualmente con su respectiva variación en el rango en la pestaña “Variables de Diseño” teniendo muy en cuenta los intervalos paramétricos y de optimización.

Figura 5

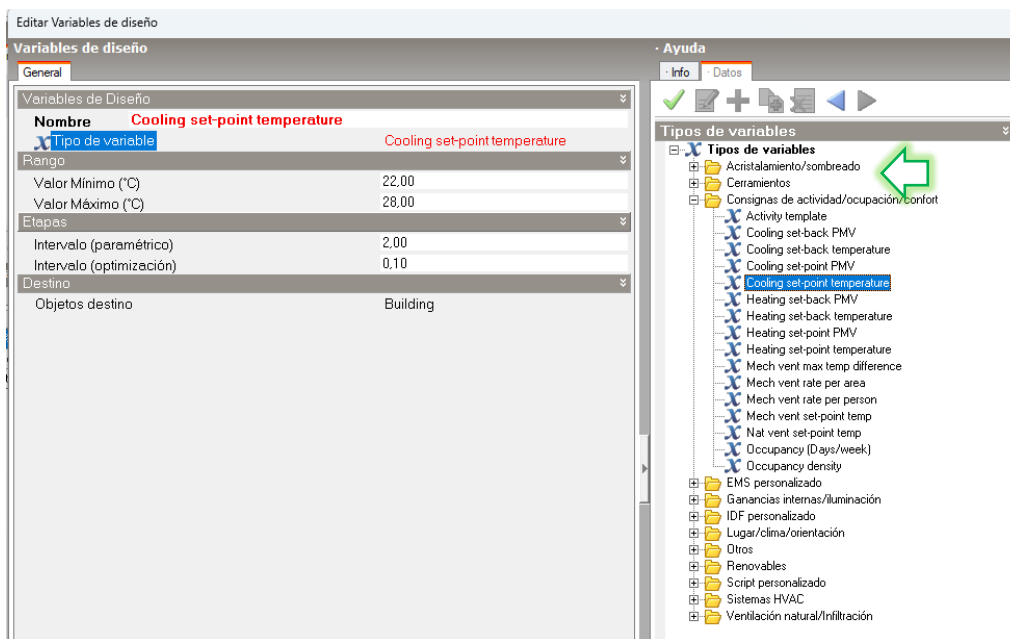
Pestaña Variables de diseño



Nota. Pestaña de configuración de las variables de diseño. Tomado de DesignBuilder

Figura 6

configuración de Variables de diseño

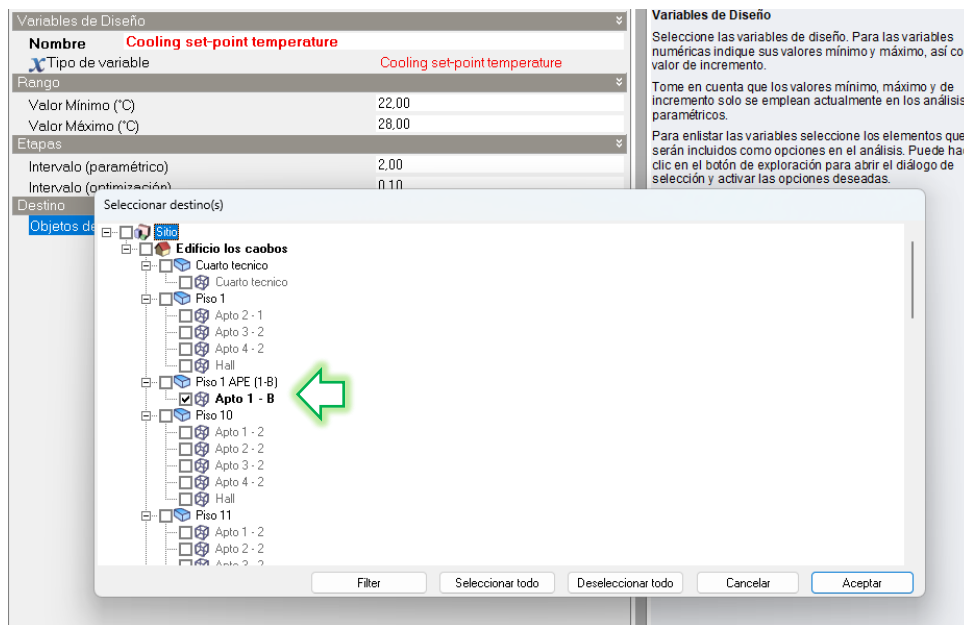


Nota. Configuración de las variables de diseño. Tomado de DesignBuilder

La configuración permite cambiar la zona en la que se requiere realizar el análisis con la opción “objetos de destino” como se muestra en la Figura 7.

Figura 7

Objeto de destino

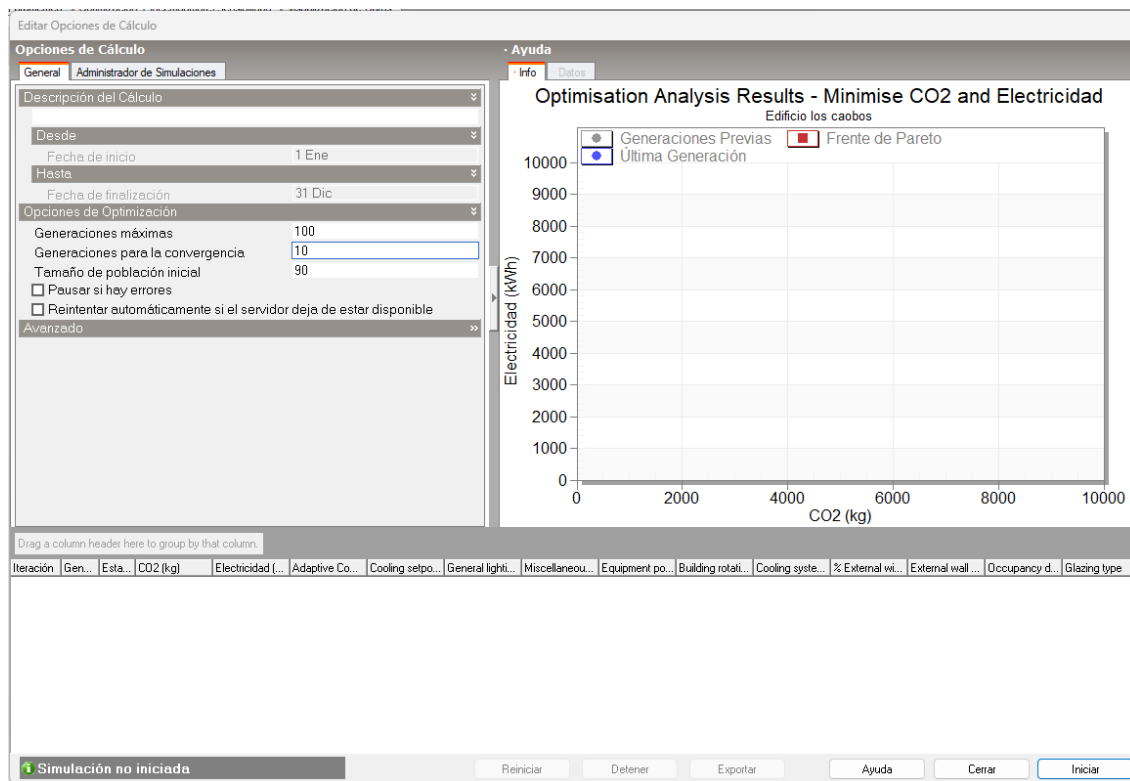


Nota. Selección del objeto de destino. Tomado de DesignBuilder

Posteriormente habiendo configurado el módulo de click en aceptar y aparecerá la interfaz de opciones de cálculo en donde se configuran las opciones de optimización como se muestra en la Figura 8.

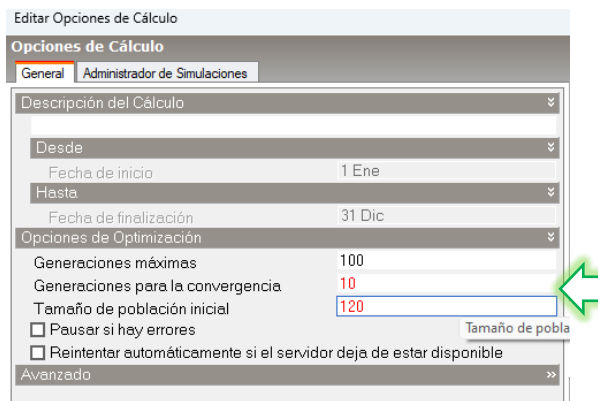
Figura 8

Opciones de cálculo



Nota. Interfaz de opciones de cálculo del módulo de optimización. Tomado de DesignBuilder

Para configurar el inicio de la simulación de ser necesario se debe cambiar el número de generaciones máximas, las generaciones para la convergencia y el tamaño de población inicial como se evidencia en la Figura 9.

Figura 9*Configuración de opciones de cálculo*

Nota. Configuración de las opciones de cálculo. Tomado de DesignBuilder

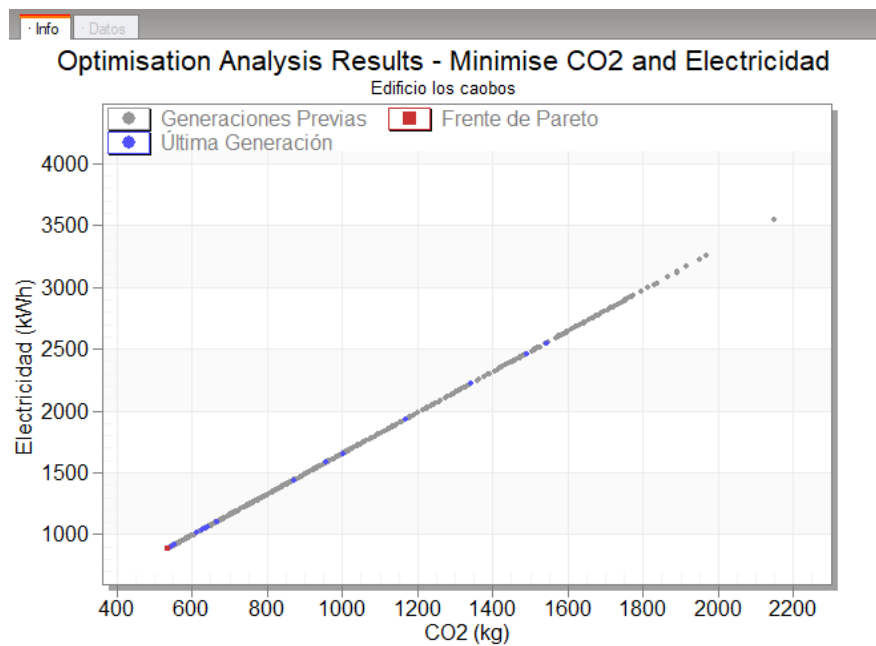
Las generaciones máximas (número máximo al que pueden llegar antes de la convergencia y detenerse la simulación) permanecieron configuradas para este caso con el valor 100 que trae por defecto el programa.

Las generaciones para la convergencia, se configuro con un valor de 10 (lo que significa que si después de la primera generación (0) pasan 10 generaciones y el resultado de la generación (0) sigue siendo la solución el sistema detecta que no habrá soluciones mejores y converge).

En cuanto al tamaño de la población se recomienda que para mejores resultados se configure entre 60 y 100, esto cuando se optimizan varias variables a la vez. El rango está definido de esa manera ya que, si es un valor bajo el algoritmo toma pocos valores para las soluciones y si es alto la simulación puede tardarse demasiado el proceso. Finalmente se inicia la simulación para la obtención de la gráfica Figura 10 y tabla del proceso como se observa en la Figura 11.

Figura 10

Grafica optimización



Nota. Grafica con las soluciones posibles en el módulo de optimización. Tomado de DesignBuilder

Los puntos azules son la última generación simulada, los puntos grises son las generaciones anteriores a la última y el punto rojo es el frente de Pareto el cual es el punto con la solución siendo la mejor alternativa para este caso con un mayor ahorro energético, la Figura 10 muestra subrayada la solución con los valores obtenidos para cada variable.

Figura 11

Tabla optimización

Drag a column header here to group by that column.												
Iteración	Genera...	Estatus	CO2 (kg)	Electricidad (KWh)	Cooling setpoint t...	Computer power...	General lighting p...	Miscellaneous po...	Equipment power...	Building rotation (°)	Cooling system CoP	% External windo...
604	28		539,516	889,82	24,700	0,500	3,400	5,000	0,250	325,000	2,750	59,000
603	28		1491,261	2460,78	23,400	4,000	2,600	5,000	2,750	315,000	4,500	56,000
602	28		541,316	893,17	25,500	0,500	3,600	5,000	0,250	55,000	3,350	42,000
601	28		553,524	913,29	24,200	0,500	4,800	5,000	0,250	170,000	3,100	46,000
600	28	Soluci...	535,165	883,11	27,200	0,500	3,000	5,000	0,250	355,000	4,300	19,000
599	28		626,714	1034,15	25,400	0,500	4,000	5,200	0,500	145,000	4,050	32,000
598	28		1167,227	1926,07	22,500	1,000	2,200	18,000	0,500	325,000	2,800	59,000
597	28		537,251	886,46	24,600	0,500	3,200	5,000	0,250	75,000	3,550	42,000
596	27		539,228	889,82	24,700	0,500	3,400	5,000	0,250	215,000	4,550	18,000
595	27		671,656	1107,62	22,000	0,500	2,800	5,000	0,250	225,000	2,750	50,000

Terminado

Reiniciar Detener Exportar Ayuda Cerrar Iniciar

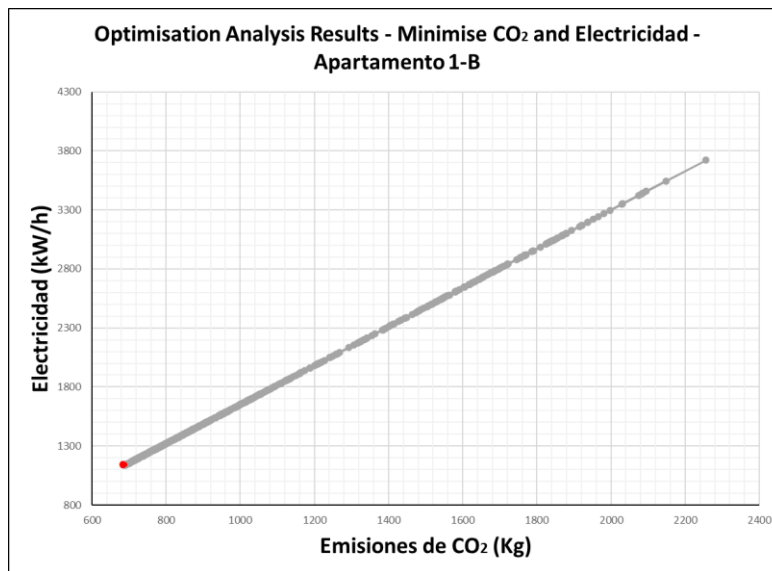
Nota. Tabla con las soluciones posibles en el módulo de optimización. Tomado de DesignBuilder

Finalmente se puede exportar los resultados como un archivo de Excel (.csv), en donde se recomienda guardarlo como un libro de Excel (.xlsx) para realizar el análisis de correlación de variables en Python.

Apéndice J. Graficas módulo de optimización en DesignBuilder

Figura 1

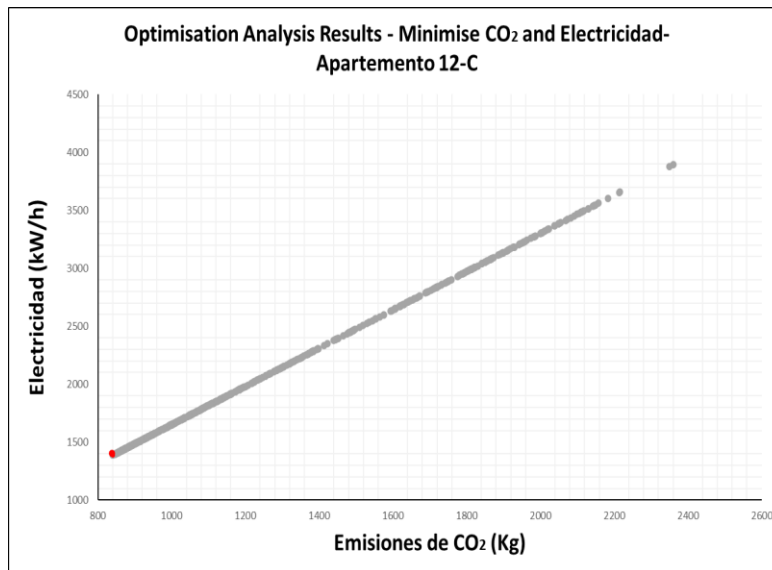
Gráfica solución de Pareto apartamento 1-B (Total)



Nota. Frente de Pareto con la solución y las posibles soluciones para mejorar el ahorro energético apartamento 1-B. Recursos propios.

Figura 2

Gráfica solución de Pareto apartamento 12-C (Total)



Nota. Frente de Pareto con la solución y las posibles soluciones para mejorar el ahorro energético apartamento 12-C. Recursos propios.

Apéndice K. Código en Python para realizar el análisis de correlación por el método de Pearson

Figura 1

Código en Python

```
[ ]: import pandas as pd          # Librería de datos estructurados (tablas)
import numpy as np              # Librería de datos (amplias funciones numericas)

import matplotlib.pyplot as plt # Librería de visualización de datos (graficas)
import seaborn as sb           # Librería de visualización de datos (mapas de calor)

from scipy.stats import pearsonr # Función para el coeficiente de correlación de Pearson

[ ]: %matplotlib inline

[ ]: Datos_simulacion_APTOS = pd.read_excel('APTO_12-C_3FINAL.xlsx')
# Verificar si los datos se cargaron correctamente
print(Datos_simulacion_APTOS.head()) # Visualizar una parte del dataframe sin imprimir todo.

[ ]: # Calcular la matriz de correlación de las variables usando el método de Pearson
correlation_matrix = Datos_simulacion_APTOS.corr(method='pearson')
print(correlation_matrix)          # Mostrar la matriz de correlación

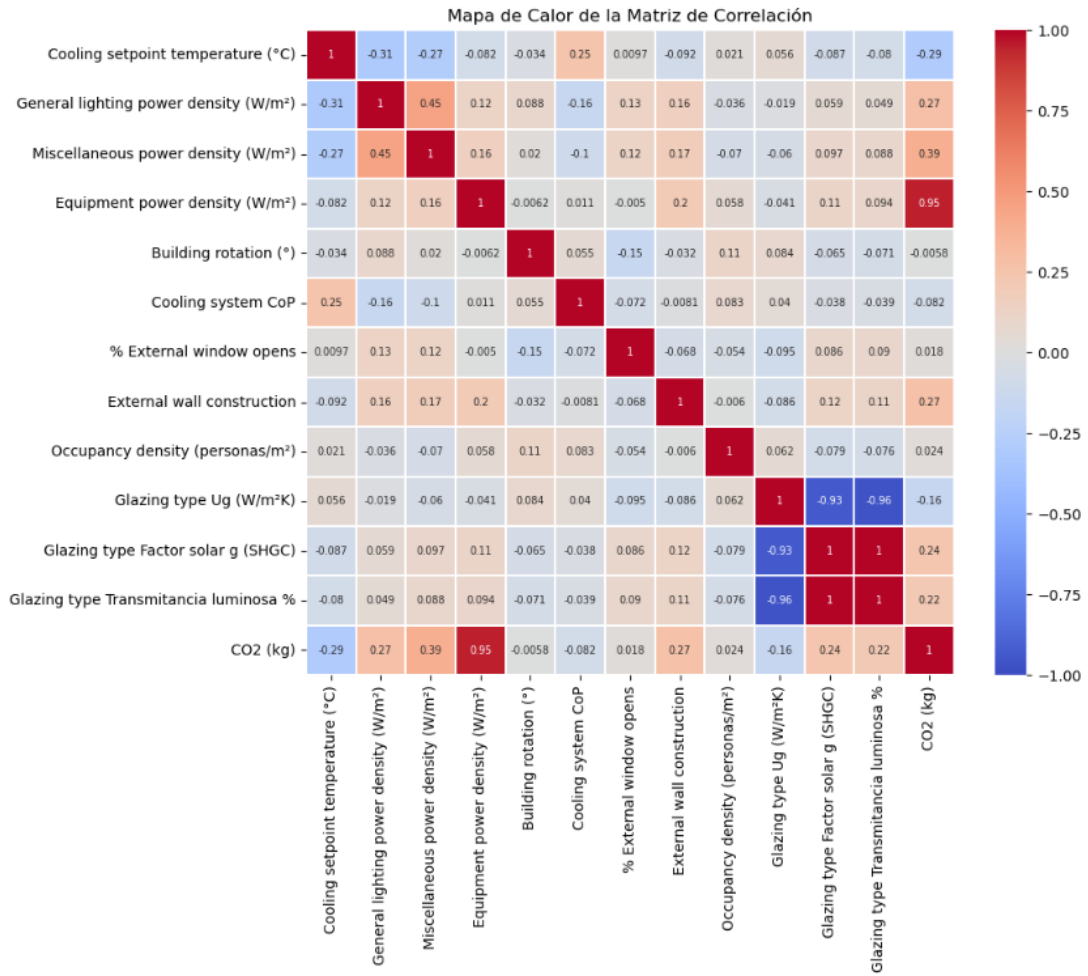
[ ]: # Graficar un mapa de calor de la matriz de correlación
plt.figure(figsize=(10, 8))       # Ajustar el tamaño del gráfico
# annot=True                       # Muestra los valores numericos en las celdas del mapa de calor
# cmap='coolwarm'                  # Define los colores del mapa de calor
# vmin=-1, vmax=1                  # Se establece los valores de correlación negativa y positiva
sb.heatmap(correlation_matrix, annot=True, cmap='coolwarm', vmin=-1, vmax=1, annot_kws={"size":7},linewidths=0.1) # Mapa de calor con valores entre -1 y 1
plt.title("Mapa de Calor de la Matriz de Correlación") # Agrega el título a la gráfica
plt.show()                         # Imprime la gráfica
```

Nota. Código en Python para realizar el análisis de correlación de variables. Recursos propios

Apéndice L. Matrices de correlación en Python para los objetivos CO₂ y confort.

Figura 1

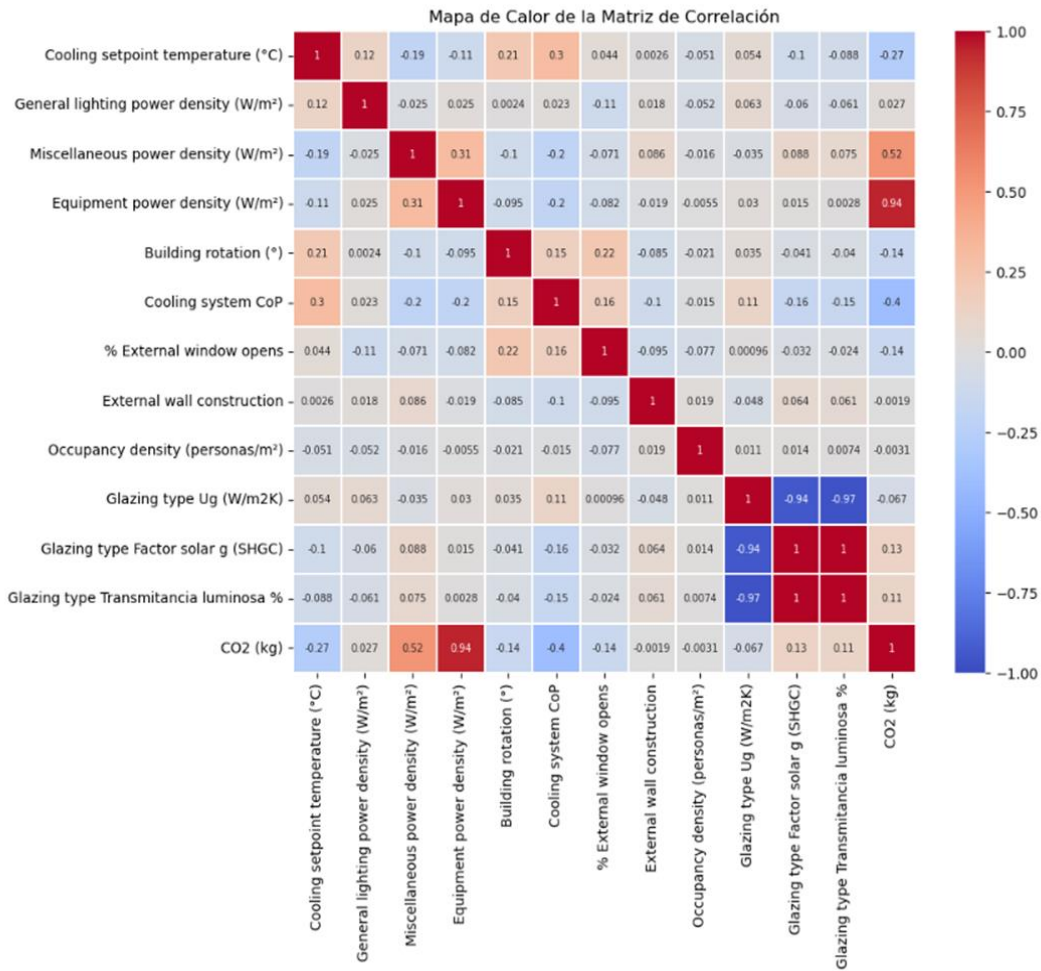
Matriz de correlación de variables CO₂ apartamento (1-B)



Nota. Matriz de correlación de variables realizada en Python para el apartamento (1-B). Recursos propios.

Figura 2

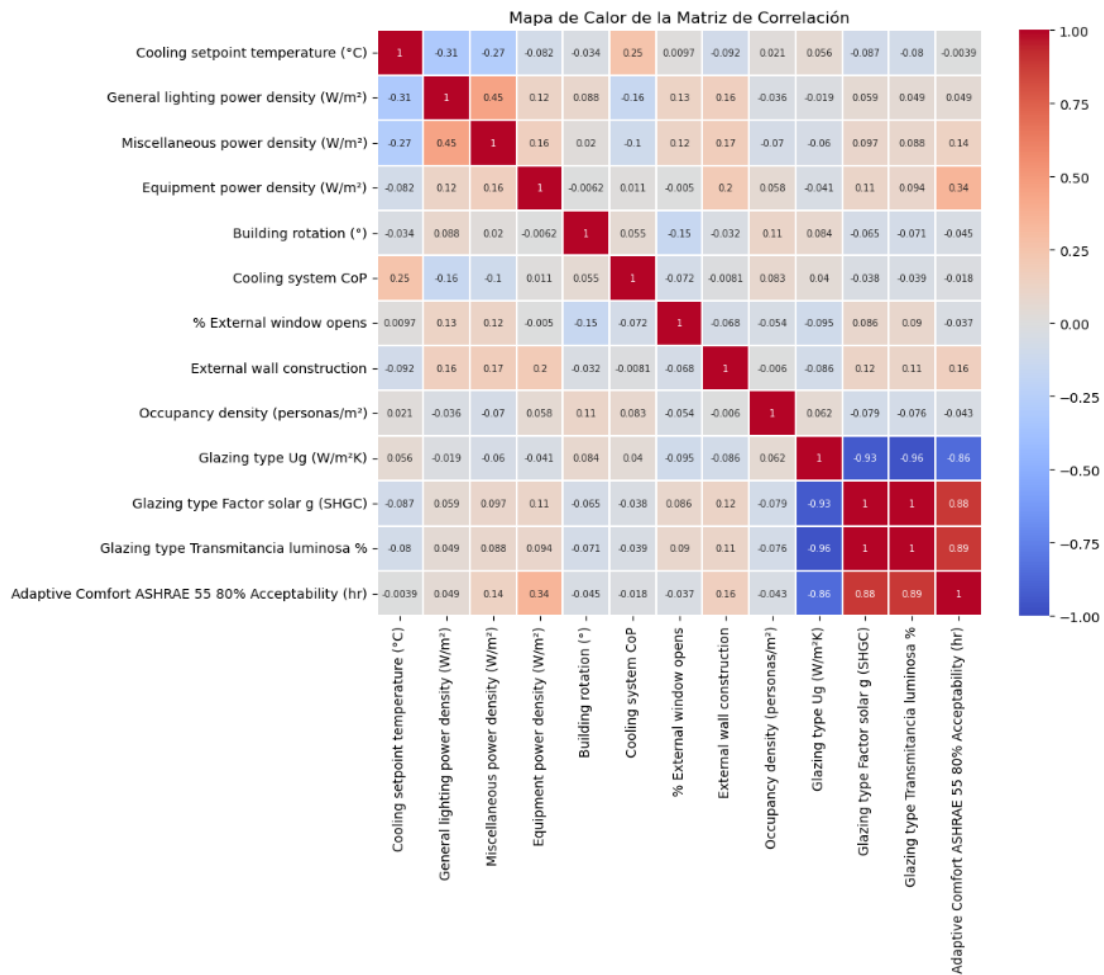
Matriz de correlación de variables CO₂ apartamento (12-C)



Nota. Matriz de correlación de variables realizada en Python para el apartamento (12-C). Recursos propios.

Figura 3

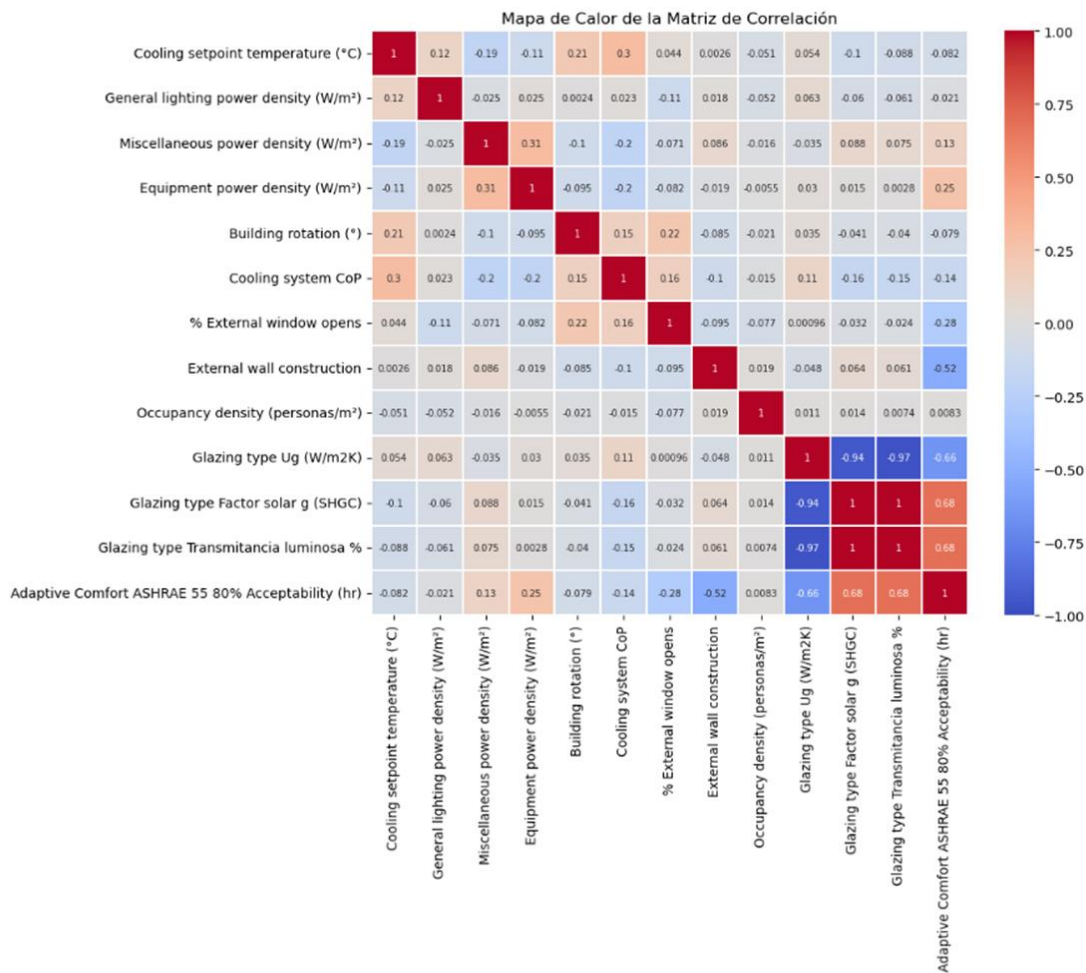
Matriz de correlación de variables Discomfort ASHRAE 55 apartamento (1-B)



Nota. Matriz de correlación de variables realizada en Python para el apartamento (1-B). Recursos propios.

Figura 4

Matriz de correlación de variables Discomfort ASHRAE 55 apartamento (12-C)



Nota. Matriz de correlación de variables realizada en Python para el apartamento (12-C). Recursos propios.