HERRAMIENTA METODOLÓGICA PARA EL ANÁLISIS EFICIENTE DE SIMULACIONES ENERGÉTICAS DE EDIFICACIONES EN EL TRÓPICO

JORGE LUIS CÁRDENAS RANGEL

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA
BUCARAMANGA
2017

HERRAMIENTA METODOLÓGICA PARA EL ANÁLISIS EFICIENTE DE SIMULACIONES ENERGÉTICAS DE EDIFICACIONES EN EL TRÓPICO

JORGE LUIS CÁRDENAS RANGEL

Trabajo de grado para optar por el título de Magister en Ingeniería Eléctrica.

Director: Dr. Gabriel Ordóñez Plata

Codirector: Dr. Germán Osma Pinto

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA
BUCARAMANGA
2017

A mi familia

AGRADECIMIENTOS

A Dios por todas las bendiciones recibidas.

A los Doctores Gabriel Ordoñez Plata y Germán Osma Pinto, por su amistad, apoyo y orientación en el desarrollo de este trabajo.

A Laura Amado por su amistad y compañerismo durante todo mi proceso de formación.

A Diana Margarita por su amistad incondicional y su consejo siempre certero.

A mi Alma Mater por brindarme las herramientas necesarias para la culminación de esta meta.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN 17

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN 20

OBJETIVOS DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN 23

DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN 24

1. PROCESO DE DISEÑO CON ENFOQUE ENERGÉTICO 25

1.1. PROCESO DE DISEÑO ENERGÉTICO 26

1.1.1. Actores 27

1.1.2. Objetivos 29

1.1.3. Herramientas computacionales de apoyo 29

1.1.4. Fases 31

1.2. FACTORES CONDICIONANTES DEL DESEMPEÑO ENERGÉTICO DE LAS EDIFICACIONES EN EL TRÓPICO 36

1.3. ESTRATEGIAS DE AHORRO ENERGÉTICO 37

2. SELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN ENERGÉTICA 40

2.1. HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN ENERGÉTICA PRESELECCIONADAS 40

2.2. IDENTIFICACIÓN DE CRITERIOS PARA LA EVALUACIÓN DE LAS HSE PRESELECCIONADAS 42

2.3. EVALUACIÓN DE LAS HSE PRESELECCIONADAS 44

3. CREACIÓN DE LOS MODELOS VIRTUALES DE LAS EDIFICACIONES SELECCIONADAS 49

3.1. DESCRIPCIÓN DE LAS EDIFICACIONES 49

3.2. MODELADO VIRTUAL 51

3.2.1. Modelado geométrico 51

3.2.2. Asignación de datos a los modelos geométricos 53

4. **AJUSTE DE LOS MODELOS VIRTUALES** 56

4.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL AJUSTE DE MODELOS VIRTUALES DE EDIFICACIONES 56

4.1.1. Generalidades de la calibración de modelos virtuales 56

4.1.2. Criterios para evaluar la calibración 58

4.1.3. Valores de aceptación para la calibración 59

4.2. METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN 60

4.2.1. Descripción de la metodología de calibración 60

4.2.2. Desarrollo de la metodología de calibración 62

5. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO ENERGÉTICO 65

5.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DE LA EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO ENERGÉTICO DE EDIFICACIONES 65

5.1.1. Desempeño energético de edificaciones 65

5.1.2. Clasificación del desempeño energético 66

5.1.3. Indicadores para la evaluación comparativa del desempeño energético 67

5.1.4. Valores límite para la evaluación comparativa del desempeño energético 68

5.1.5. Escalas de valoración del desempeño energético de edificaciones 71

5.2. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO ENERGÉTICO DE LAS EDIFICACIONES OBJETO DE ESTUDIO. 72

5.2.1. Fase 1: Análisis general del comportamiento energético 72

5.2.2. Fase 2: Modelado y simulación del Edificio de referencia 83

5.2.3. Fase 3: Evaluación comparativa por indicadores de desempeño 84

6. HERRAMIENTA METODOLÓGICA PARA EL ANÁLISIS EFICIENTE DE SIMULACIONES ENERGÉTICAS DE EDIFICACIONES EN EL TRÓPICO 90

6.1. FASE 1: DEFINICIÓN DEL TIPO DE EDIFICACIÓN A EVALUAR 93

6.1.1. Edificación en proceso de diseño 93

6.1.2. Edificación existente 94

6.2. FASE 2: MODELADO VIRTUAL DE LA EDIFICACIÓN 94

6.2.1. ETAPA 1: Obtención del modelo virtual de la edificación a evaluar 94

6.2.2. ETAPA 2: Calibración del modelo virtual 96

6.2.3. ETAPA 3: Obtención del modelo virtual de la edificación de referencia 97

6.3. FASE 3: SIMULACIÓN ENERGÉTICA 100

6.3.1. ETAPA 1: Configuración de simulación del modelo virtual 102

6.3.2. ETAPA 2: Configuración de simulación del modelo virtual del edificio de referencia 102

6.3.3. ETAPA 3: Configuraciones de simulación especiales 103

6.4. FASE 4: EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO ENERGÉTICO 104

6.4.1. ETAPA 1: Análisis energético del edificio 104

6.4.2. ETAPA 2: Evaluación del desempeño energético 106

6.4.3. ETAPA 3: Generación de recomendaciones de mejora 109

7. CONCLUSIONES 113

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 117

BIBLIOGRAFÍA 127

ANEXOS 136

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Trabajos de grados en el área de simulación energética de edificaciones. ... 18

Tabla 2. Ponencias en el área de simulación energética de edificaciones. 19

Tabla 3. Artículos publicados en el área de simulación energética de edificaciones. .. 20

Tabla 4. Objetivos específicos y alcances del trabajo de investigación. 23

Tabla 5. Funciones de los actores en el proceso de diseño con enfoque energético. . 28

Tabla 6. Principales objetivos del proceso de diseño con enfoque energético.. 29

Tabla 7. Usos de las HSE en las diferentes fases del proceso de diseño. 30

Tabla 8. Descripción de la fase de diseño conceptual. 33

Tabla 9. Descripción de la fase de diseño esquemático..... 34

Tabla 10. Descripción de la fase de desarrollo del diseño. 35

Tabla 11. Descripción de la fase de documentos de construcción. 36

Tabla 12. Recopilación de estrategias de ahorro energético..... 38

Tabla 13. Desglose de características asociadas a los criterios de selección. 44

Tabla 14. Escala de puntos para la calificación de las características asociadas a los criterios de selección. 45

Tabla 15. Versiones de las herramientas de simulación preseleccionadas. 46

Tabla 16. Calificación de los criterios de selección. 46

Tabla 17. Características generales de las edificaciones seleccionadas. 50

Tabla 18. Descripción elementos constructivos que componen las edificaciones seleccionadas. 50

Tabla 19. Principales características de los sistemas de climatización de las edificaciones seleccionadas. 51

Tabla 20. Niveles de calibración de modelos virtuales según información disponible de una edificación..... 57

Tabla 21. Índices estadísticos para evaluar la calibración de modelos virtuales 58

Tabla 22. Valores de aceptación para los indicadores estadísticos de evaluación de la calibración. 59

Tabla 23. Diferencia porcentual entre valores medidos y simulados del consumo anual energético de los modelos virtuales en primer nivel de calibración. 62

Tabla 24. Diferencia porcentual entre valores medidos y simulados del consumo anual energético de los modelos virtuales en el Nivel II de calibración. 63

Tabla 25. Indicadores para la evaluación de aspectos energéticos y ambientales de las edificaciones. 68

Tabla 26. Línea base consumo energético Resolución 0549 de 2015. 69

Tabla 27. Diferencias entre los modelos energéticos del edificio evaluado y el edificio base..... 70

Tabla 28. Resumen hallazgos claves del comportamiento energético de las edificaciones objeto de estudio. 82

Tabla 29. Resultados de simulación útiles para la estimación de los indicadores de desempeño energético. 85

Tabla 30. Indicadores de desempeño energético Edificios de Ingeniería Eléctrica e Ingeniería Industrial. 86

Tabla 31. Valoración del desempeño energético de los Edificios de Ingeniería Eléctrica e Ingeniería Industrial, según sistemas de evaluación LEED, BREEAM y CALENER. 88

Tabla 32. Indicadores para la evaluación del desempeño energético. 107

Tabla 33. Recomendaciones a tener en cuenta en el análisis del ahorro energético de refrigeración e iluminación, así como en la reducción de emisiones de gases contaminantes. 108

Tabla 34. Estrategias para el mejoramiento del desempeño energético de la edificación evaluada. 110

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Consolidado de resultados de una simulación energética en DesignBuilder.22

Figura 2. Estructura del documento. 24

Figura 3. Organización de los actores en un proceso de diseño convencional. 27

Figura 4. Organización de los actores en un proceso de diseño con enfoque energético. 28

Figura 5. Esquema general de un proceso de diseño con enfoque energético. 32

Figura 6. Factores influyentes en el desempeño energético de edificaciones en climas tropicales. 36

Figura 7. Frecuencia de uso de las herramientas de simulación energética según muestra de artículos científicos. 41

Figura 8. Distribución en el tiempo del uso de las herramientas de simulación energética con mayor frecuencia de uso. 42

Figura 9. Modelos geométricos en DesignBuilder que representan las edificaciones objeto de estudio. 52

Figura 10. Modelos energéticos renderizados de las edificaciones objeto de estudio.54

Figura 11. Diagrama de flujo de la metodología seguida para la calibración de los modelos energético de las edificaciones seleccionadas. 61

Figura 12. Escalas de valoración del rendimiento energético de edificaciones. Tomado de [49]. 72

Figura 13. Desglose del consumo energético anual del Edificio de Ingeniería Eléctrica. 73

Figura 14. Índices del confort térmico del Edificio de Ingeniería Eléctrica. 74

Figura 15. Valores anuales de las ganancias térmicas interiores del Edificio de Ingeniería Eléctrica. 75

Figura 16. Ganancias térmicas en cerramientos del Edificio de Ingeniería Eléctrica para el día crítico del 2015. 76

Figura 17. Desglose del consumo energético anual del Edificio de Ingeniería Industrial. 77

Figura 18. Índices del confort térmico del Edificio de Ingeniería Industrial. 77

Figura 19. Ganancias térmicas interiores en el Edificios de Ingeniería Industrial. 78

Figura 20. Ganancias térmicas en cerramientos del Edificio de Ingeniería Industrial para el día crítico. 79

Figura 21. Desglose del consumo energético de la vivienda de interés social. 80

Figura 22. Índices del confort térmico para la vivienda de interés social. 80

Figura 23. Ganancias térmicas interiores vivienda de interés social. 81

Figura 24. Balance térmico de cerramientos en el día crítico para la vivienda de interés social. 81

Figura 25. Modelos virtuales base. 84

Figura 26. Esquema general de la herramienta metodológica para la evaluación del desempeño energético de edificaciones en el trópico. 91

Figura 27. Esquema general de la herramienta metodológica adaptada para la evaluación energética de edificaciones residenciales de baja altura. 92

Figura 28. Procedimiento de la actividad de modelado geométrico. 95

Figura 29. Procedimiento de la actividad de asignación de datos. 96

Figura 30. Procedimiento de la actividad de calibración del modelo virtual. 97

Figura 31. Procedimiento de la actividad de configuración de la geometría del modelo virtual base. 98

Figura 32. Procedimiento de la actividad de configuración de los datos del modelo virtual del edificio de referencia. 99

Figura 33. Procedimiento de la actividad de configuración del sistema HVAC del modelo virtual del edificio de referencia. 100

Figura 34. Cuadro dialogo “Editar Opciones de Cálculo”. 101

Figura 35. Cuadro de dialogo “Opciones de Cálculo”. 101

Figura 36. Procedimiento de la etapa de configuración de simulación del modelo virtual de la edificación evaluada. 102

Figura 37. Procedimiento de la etapa de configuraciones de simulación del modelo virtual del edificio de referencia. 103

Figura 38. Procedimiento de la etapa de configuraciones de simulación especiales. 104

Figura 39. Procedimiento de la etapa de análisis energético del edificio. 105

Figura 40. Resumen procedimientos etapa de evaluación del desempeño energético. 109

ANEXOS

ANEXO A. Encuesta para la caracterización del proceso de diseño energético…….137

ANEXO B. Estrategias de ahorro energético……141

ANEXO C. Descripción de las HSE preseleccionadas……171

ANEXO D. Calificación criterios de selección……178

ANEXO E. Datos de los modelos virtuales……181

RESUMEN

TÍTULO: HERRAMIENTA METODOLÓGICA PARA EL ANÁLISIS EFICIENTE DE SIMULACIONES ENERGÉTICAS DE EDIFICACIONES TROPICALES.[1]

AUTOR: JORGE LUIS CÁRDENAS RANGEL.[2]

PALABRAS CLAVE: DESEMPEÑO ENERGÉTICO, SIMULACIÓN ENERGÉTICA, EDIFICACIONES TROPICALES.

DESCRIPCIÓN:

El diseño de edificaciones energéticamente eficientes requiere del uso de herramientas de simulación energética. Estas no están siendo utilizadas frecuentemente por los equipos de diseño debido a los niveles elevados de conocimiento y experiencia que requieren los usuarios de las mismas en aspectos como la obtención y análisis de resultados.

Este documento propone una metodología que tiene por objeto reducir la experticia de los usuarios de las herramientas de simulación energética para el análisis y evaluación del desempeño energético de edificaciones tropicales. Dicha metodología se fundamenta en la evaluación comparativa por indicadores, y tiene en cuenta valores de referencia como la línea base de la Resolución 0549 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, así como el edificio de referencia recomendado en el Apéndice G de la ASHRAE 90.1.

Para su obtención varias actividades fueron desarrolladas. Inicialmente, el escenario de uso de la metodología fue establecido a partir de la identificación de las principales características de un proceso de diseño con enfoque energético. Posteriormente, teniendo en cuenta una muestra de 100 artículos científicos y un grupo de criterios de selección se escogió la herramienta de simulación energética más pertinente para el análisis y evaluación del desempeño energético de edificaciones tropicales. La cual fue usada para el modelado virtual, ajuste, simulación y análisis energético de tres edificaciones (dos de tipo universitario y una vivienda de interés social), lo anterior, con el objetivo de identificar resultados de simulación útiles, y procedimientos para el análisis y evaluación del desempeño energético de edificaciones tropicales.

En cuanto a su ámbito de aplicación, esta herramienta metodología puede ser usada para la evaluación del desempeño energético de edificaciones tropicales de varios tipos que estén en etapa de diseño o en operación.

[1] Trabajo de investigación de maestría.

[2] Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Dr. Gabriel Ordóñez Plata. Codirector: Dr. Germán Osma Pinto.

ABSTRACT

TITLE: HERRAMIENTA METODOLÓGICA PARA EL ANÁLISIS EFICIENTE DE SIMULACIONES ENERGÉTICAS DE EDIFICACIONES TROPICALES.[3]

AUTHOR: JORGE LUIS CÁRDENAS RANGEL.[4]

KEYWORDS: ENERGY PERFORMANCE, ENERGY SIMULATION, TROPICAL BUILDINGS.

DESCRIPTION:

The design of energy efficient buildings requires the use of energy simulation tools. These are not being used frequently by design teams because of the high levels of knowledge and experience required by users of these tools in aspects such as obtaining and analyzing the results.

This document proposes a methodology that aims to reduce the expertise of users of energy simulation tools for the analysis and evaluation of the energy performance of tropical buildings. This methodology is based on comparative assessment by indicators and takes into account reference values such as the baseline of Resolution 0549 of the *Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia*, as well as the reference building recommended in Appendix G of the ASHRAE 90.1.

To obtain this methodology several activities were developed. Initially, the methodology use scenario was established based on the identification of the main characteristics of an energy design process.

Subsequently, the most relevant energy simulation tool for the analysis and evaluation of the energy performance of tropical buildings was chosen taking into account a sample of 100 scientific articles and a group of selection criteria. This tool was used for the virtual modeling, adjustment, simulation and energy analysis of three buildings (two university type and one social dwelling). This process had the objective of identifying useful simulation results and procedures for the analysis and evaluation of the energy performance of tropical buildings.

As for its scope of application, the methodology can be used for the evaluation of the energy performance of tropical buildings of various types that are in the design stage or in operation.

[3] Master thesis.

[4] Department of Physical-Mechanical Engineerings. School of Electrical, Electronic and of Telecommunications Engineerings. Director: Dr. Gabriel Ordóñez Plata. Codirector: Dr. Germán Osma Pinto.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, se evidencia un incremento cercano al 30% en la demanda energética en el sector de las edificaciones en los países ubicados en la zona tropical [1]–[3]. La causa principal de este fenómeno en la mayoría de esta zona son las condiciones climáticas de elevadas temperaturas y alta humedad, y el aumento del poder adquisitivo de las personas. Esto conlleva a un uso intensivo de equipos de climatización para satisfacer las necesidades de confort térmico y, por consiguiente, a consumos energéticos elevados [1]–[5].

Teniendo en cuenta esta situación, los equipos de diseño de edificaciones alrededor del mundo están estableciendo como uno de sus objetivos la reducción del consumo de energía en los edificios [6], lo cual puede ser logrado a través del diseño de edificaciones energéticamente eficientes que incluyan estrategias de ahorro energético activas y pasivas [7]–[9].

En Colombia, el diseño de edificaciones energéticamente eficientes está en aumento debido al surgimiento de regulaciones como la Resolución 0549 de 2015, así como a la promoción de buenas prácticas energéticas realizada por entidades como el Consejo Colombiano de Construcción Sostenible y la Cámara Colombiana de la Construcción. Esto puede conllevar un incremento en el uso de herramientas de soporte especializadas como las herramientas de simulación energética[5] [10]. Dichas herramientas proveen información a los usuarios que permite estimar indicadores de rendimiento en las edificaciones, en tópicos como el consumo energético, la sostenibilidad ambiental, el confort interior y los costos de implementación, entre otros [8], [10].

El proceso de diseño de edificaciones energéticamente eficientes asistido por herramientas de simulación energética permite a los miembros del equipo diseñador estudiar diversas estrategias de diseño y evaluar el desempeño de las edificaciones con respecto a estándares. En estos procesos es común que se generen una gran

[5] Herramientas software usadas para la evaluación del comportamiento energético de edificaciones, así como de estrategias de diseño y cumplimiento con estándares de certificación ambiental.

cantidad de datos y gráficas en cada una de las simulaciones que se realicen [8], lo cual sumado a la inexperiencia del diseñador y la dificultad en el manejo de las interfaces de usuario, se identifican como las principales barreras para la integración de este tipo de herramientas software en el proceso de diseño de edificaciones a nivel mundial.

En este sentido, este trabajo de investigación propone una herramienta metodológica para realizar el análisis eficiente de simulaciones energéticas en el trópico que permita un mejor aprovechamiento de los resultados para la evaluación del desempeño energético de edificaciones.

Esta investigación hace parte de la línea de investigación de Uso Racional de la Energía (URE) y Energías Renovables del Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica – GISEL de la Universidad Industrial de Santander, y hace parte de un esfuerzo continuado en el área de simulación energética, que a la fecha cuenta con el desarrollo de doce (12) proyectos de pregrado. Como producto de este trabajo de investigación se han realizado tres (3) ponencias en eventos internacionales y dos (2) publicaciones en revistas indexadas. Las tablas 1, 2, y 3 presentan la relación de los trabajos de investigación realizados.

Tabla 1. Trabajos de grados desarrollados en el área de simulación energética de edificaciones.

Titulo	Autores	Director/ Codirector(es)	Año
Evaluación de las estrategias de confort visual y térmico establecidas para el edificio de Ingeniería Eléctrica según lineamientos del sistema de certificación LEED a partir de la herramienta DesignBuilder	Oscar Pulido & Marvin Meneses	German Osma / Gabriel Ordóñez	2012
Análisis energético del Edificio de Estudios Industriales y Empresariales según lineamiento del sistema de certificación LEED a partir del uso de la herramienta Autodesk Ecotect	Maira López, Ángela Rojas & Ivonne Ruz	German Osma / Gabriel Ordóñez	2012
Influencia de parámetros de diseño de aplicaciones sostenibles sobre el consumo energético en las instalaciones del quinto piso del edificio de Ingeniería Eléctrica a partir de simulaciones con DesignBuilder	Gabriel Anaya, César Avellaneda & Jorge Cárdenas	German Osma / Johann Petit	2013

Análisis energético del Edificio de Ingeniería Industrial según lineamientos del sistema de certificación LEED a partir del uso de la herramienta Ecotect: Calibración del modelo	Juan Arango & María Fernández	German Osma / Gabriel Ordóñez	2013
Evaluación de la plataforma EnergyPlus como herramienta para el análisis energético en un entorno tropical: caso Bucaramanga	Javier Jiménez & Carlos Rodríguez	German Osma / Gabriel Ordóñez	2013
Descripción del comportamiento energético de una vivienda de interés social a partir de la simulación con DesignBuilder	Julián Gutiérrez & Anderson Merchán	German Osma / Gabriel Ordóñez	2014
Herramientas computacionales para análisis energético de viviendas de interés social	Roger Mantilla & Marlon Millán	German Osma / Gabriel Ordóñez	2014
Aplicabilidad de tecnología en iluminación natural para una vivienda de interés social tipo	Hector Adarme, Anderson Jaimes & Hency Roballo.	German Osma / Gabriel Ordóñez	2014
Recomendaciones para el mejoramiento de la caracterización y la evaluación del diseño energético verde de edificaciones en la UIS	Sonia Echeverría & Liceth Torres	German Osma / Gabriel Ordóñez	2014
Análisis energético del Edificio de Ingeniería Eléctrica a partir del uso de la herramienta DesignBuilder: Calibración y simulaciones	Carlos Caicedo, Alejandro Torres & Saúl Mantilla	German Osma / Gabriel Ordóñez	2015
Estimación del potencial impacto de la implementación de estrategias URE en iluminación y climatización en el Edificio de Ingeniería Industrial a partir de eQUEST	Marlon Pinto, Jesús Roa & Brayan Roa	German Osma / Gabriel Ordóñez y Jorge Cárdenas	2015
Análisis comparativo de simulación energética entre DesignBuilder y EnergyPlus	Cristian Villalba & Nixon Ortiz	German Osma / Gabriel Ordóñez y Jorge Cárdenas	2016

Tabla 2. Ponencias desarrolladas en el área de simulación energética de edificaciones.

Titulo	Autores	Evento	Ciudad y año
Building energy analysis of electrical engineering building form DesignBuilder tool: calibration and simulations	Jorge Cárdenas, Germán Osma, Carlos Caicedo, Alejandro Torres, Saúl Sánchez	*II International Congress of Mechanical Engineering And Agricultural Science* (CIIMCA 2015)	B/manga, 2015.
Experiences and findings on the use of energy simulation tools for analyzing buildings in warm tropical climate	Jorge Cárdenas, Germán Osma & Gabriel Ordóñez	*II International Congress of Mechanical Engineering And Agricultural Science* (CIIMCA 2015)	B/manga, 2015.
Characterization of environmental and energy performance of a social dwelling in a tropical region of Colombia	Jorge Cárdenas, German Osma, Julián Gutiérrez, Anderson Mechan & Gabriel Ordoñez	*10th International Conferences on Urban Regeneration and Sustainability: The Sustainable City*	Medellin, 2015.

Tabla 3. Artículos publicados en el área de simulación energética de edificaciones.

Titulo	Autores	Datos de la publicación	Categoría COLCIENCIAS
Characterization of environmental and energy performance of a social dwelling in a tropical region of Colombia	Jorge Cárdenas, Germán Osma, Julián Gutiérrez, Anderson Mechan & Gabriel Ordoñez	*WIT Transactions on Ecology and the Environment, Vol. 204*	A2
Building energy analysis of electrical engineering building form DesignBuilder tool: calibration and simulations	Jorge Cárdenas, Germán Osma, Carlos Caicedo, Alejandro Torres, Saúl Sánchez	*IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 136*	C

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El consumo energético del sector de las edificaciones es de cerca del 40% de la energía total mundial, por encima de sectores como la industria y el transporte [9], [11]–[13]. En Colombia, este sector demandó en 2015 cerca del 64% del total del consumo final del país [14], se espera que para el año 2030 este valor presente un aumento cercano al 50% debido al crecimiento de la población y la demanda de servicios que buscan condiciones de confort [11]–[13], [15]. Este comportamiento suscita preocupaciones debido a las dificultades de abastecimiento, el agotameinto de los recursos energéticos convencionales y los problemas ambientales conexos. Por esta razón, reducir el consumo energético en las edificaciones es hoy un objetivo primordial de la politica energética a nivel mundial [16].

Para lograr reducciones significativas en el consumo energético es necesario diseñar edificaciones energéticamente eficientes. Este objetivo se puede alcanzar si se potencian ciertas interacciones entre el edificio, sus sistemas y el entorno climático [17]. Dichos requerimientos son complejos debido a la gran cantidad de variables que intervienen. Por este motivo, se hace necesario el uso de herramientas computacionales especializadas como las herramientas de simulación energética – HSE. Tareas como la evaluación de estrategias de diseño, el establecimiento del desempeño energético y la verificación del cumplimiento con respecto a estándares de construcción verde son facilitadas por estas herramientas [9], [11], [18], [19].

A pesar de dichas prestaciones, se han documentado barreras que impiden el uso frecuente de las HSE en el proceso de diseño de edificaciones. Según [17], algunas de las barreras más comunes están relacionadas con los costos de licencia, el déficit en la representación de datos de entrada normalizados y el desconocimiento o la no existencia de una dinámica de transferencia y apropiación tecnológica. Sin embargo, la dificultad en la interpretación y análisis de los resultados representa la barrera más significativa según la revisión de literatura realizada. De acuerdo con [20]–[22], esta barrera es debida a la forma compleja cómo se muestran los resultados de simulación y la cantidad excesiva de los mismos. Mientras que en [23]–[25] se destaca la importancia del uso de los métodos de análisis para el correcto aprovechamiento de los resultados de simulación. Como consecuencia se hace necesario que el usuario potencial de una HSE tenga competencias especiales de experiencia y conocimiento, de esta forma se limita su utilización a profesionales expertos [7], [17], [18], [20], [26], [27].

A manera de ejemplo la Figura 1 presenta el consolidado de resultados de una simulación energética que describe el comportamiento diario del consumo energético, el confort térmico, las ganancias térmicas interiores y las cargas térmicas del modelo de un edificio simulado en DesignBuilder.

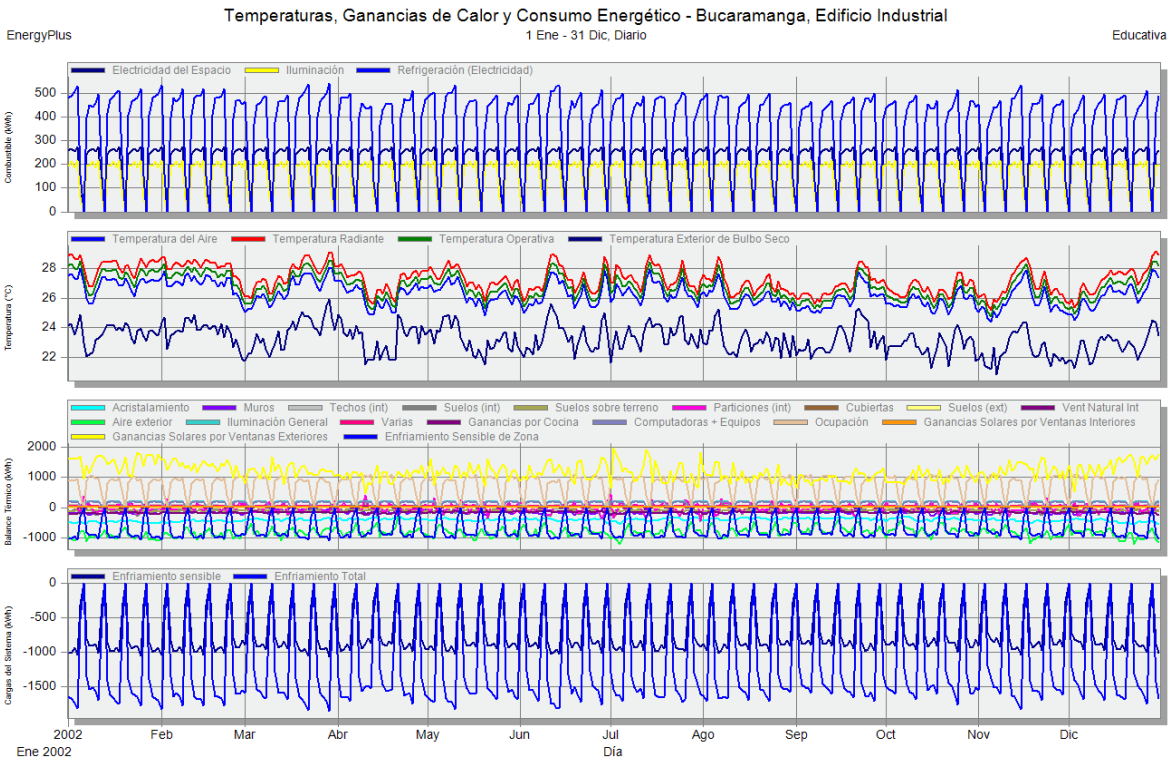
Para el análisis de una variable en particular, el usuario de la herramienta debe tener conocimientos básicos sobre del uso y configuración de la HSE, así como en métodos de evaluación y análisis que le permitan la formulación de conclusiones acerca del comportamiento de la variable estudiada.

En este sentido, el desafío en el uso de las HSE en el proceso de diseño radica en la necesidad de buscar, mostrar e interpretar resultados relevantes de una forma menos compleja según el tipo de análisis que se realiza, a fin de que no se requiera de niveles altos de experiencia y conocimiento por parte del usuario [21].

Recientemente, con la expedición de la Resolución 0549 del Ministerio de Vivienda, Cuidad y Territorio se hace necesario el uso de HSE para la verificación de los porcentajes de ahorros energético que deben ser garantizados por las empresas constructoras para nuevas edificaciones que soliciten licencia de construcción en

Bogotá, Cali, Medellín y Barranquilla a partir del 10 de julio de 2016 y en el resto del país a partir del 10 de julio de 2017.

Figura 1. Consolidado de resultados de una simulación energética en DesignBuilder.



Lo anterior, sumado al interés que en el área de diseño energético y sostenible han manifestado entidades de orden nacional como el Consejo Colombiano de Construcción Sostenible – CCCS y de orden local como el Clúster de la Construcción de la Cámara de Comercio de Bucaramanga, ha impulsado el desarrollo de este trabajo de investigación que tiene por objetivo el establecimiento una herramienta metodológica para el análisis eficiente de simulaciones energéticas de edificaciones tropicales, enfocada hacia el análisis y evaluación del desempeño energético.

Para el establecimiento de esta herramienta metodológica fue necesario responder varias cuestiones relacionadas con tópicos como la definición de su escenario de aplicación en el proceso de diseño con enfoque energético; la HSE más pertinente para ser empleada en la cuantificación de resultados útiles; el procedimiento de modelado virtual y ajuste de las edificaciones objeto de estudio; y finalmente, los

métodos de evaluación y análisis de los resultados de simulación útiles en el establecimiento energético de una edificación tropical.

OBJETIVOS DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Este trabajo de investigación establecerá una herramienta metodológica para el análisis eficiente de simulaciones energéticas en las fases finales del proceso de diseño de edificaciones en el trópico, a partir de la caracterización del proceso de diseño energético, modelado y análisis de resultados de simulaciones energéticas de tres (3) edificaciones diferentes. Para el desarrollo del objetivo general se plantearon cuatro (4) objetivos específicos, los cuales son relacionados junto con su alcance en la Tabla 4.

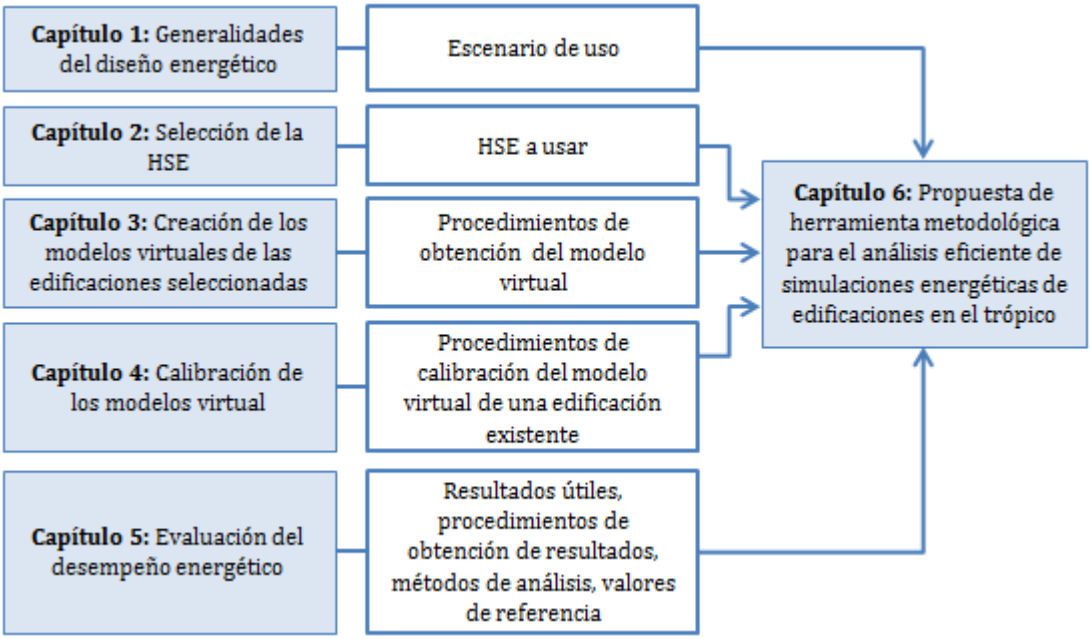
Tabla 4. Objetivos específicos y alcances del trabajo de investigación.

Objetivo específico	Alcance
Establecer la información preliminar sobre el diseño energético de edificaciones en el entorno tropical.	• Descripción de las principales características del proceso de diseño energético en el trópico (actores, herramientas computacionales usadas, y objetivos del proceso de diseño). • Identificación de factores que afectan el consumo energético de los edificios. • Identificación de estrategias para el ahorro energético.
Seleccionar al menos una herramienta de simulación energética de edificaciones a partir de criterios de interoperabilidad, usabilidad, frecuencia de uso en entornos tropicales, disponibilidad de licencia entre otros.	• Búsqueda de cuatro HSE aplicables al entorno tropical. • Identificación de criterios de selección para la determinación de la HSE de mayor adaptación al trópico. • Evaluación y selección de la HSE más adaptable al trópico.
Realizar el análisis de simulaciones energéticas de tres (3) edificaciones, con miras a determinar la información útil en el establecimiento del rendimiento energético de las edificaciones.	• Generación y calibración de tres (3) modelos virtuales de edificaciones en la HSE seleccionada. • Simulación y análisis energético. • Establecimiento del desempeño energético de las edificaciones.
Plantear una herramienta metodológica para el análisis eficiente de simulaciones energéticas en las fases finales del proceso de diseño de edificaciones en el trópico.	• La herramienta metodológica debe incluir una descripción de su escenario de uso, métodos para la obtención de resultados útiles y procedimientos de análisis.

DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Este documento se encuentra estructurado en seis capítulos. Los cinco primeros recopilan la información que es usada como insumo en diferentes fases, etapas y actividades de la herramienta metodológica propuesta en el Capítulo 6. La Figura 2 presenta la estructura del documento.

Figura 2. Estructura del documento.



Finalmente, debe destacarse que el desarrollo de este trabajo de investigación contó con el apoyo de dos trabajos de grado relacionados con el modelado virtual y análisis de simulaciones energéticas de los Edificios de Ingeniería Eléctrica e Ingeniería Industrial de la Universidad Industrial de Santander usando EnergyPlus[6] y eQUEST[7], respectivamente. Dichos trabajos presentan hallazgos que fueron útiles para la selección de la herramienta de simulación (Capitulo 2), así como para la obtención de los modelos virtuales calibrados de las edificaciones objeto de estudio (capítulos 3 y 4).

[6] Análisis comparativo de simulación energética entre DesignBuilder y EnergyPlus; Autores: Cristian Villalba & Nixon Ortiz; Director: German Osma Pinto; Codirectores: Gabriel Ordóñez y Jorge Cárdenas [102].

[7] Estimación del potencial impacto de la implementación de estrategias URE en iluminación y climatización en el edificio de estudios industriales y empresariales a partir de la herramienta eQUEST; Autores: Marlon Pinto, Jesús Roa & Brayan Roa; Director: Germán Osma Pinto; Codirectores: Gabriel Ordóñez y Jorge Cárdenas [103].

1. PROCESO DE DISEÑO CON ENFOQUE ENERGÉTICO

El clima en la mayoría de la zona tropical está caracterizado por condiciones de alta humedad, abundante precipitación y gran cantidad de radiación solar [28]. Dichas condiciones climáticas, junto con el aumento del poder adquisitivo de sectores importantes de la población, ocasionan mayor demanda de energía en las edificaciones, y en consecuencia, mayores emisiones de gases contaminantes [1], [29]. Esta situación problemática puede ser mitigada a través del diseño de edificaciones energéticamente eficientes.

En Colombia, entidades adscritas al Gobierno Nacional están realizando esfuerzos por regular el mejoramiento y certificación del desempeño energético de las edificaciones. Tal es el caso de Ministerio de Vivienda, Cuidad y Territorio - MINVIVIENDA, entidad que en julio de 2015 expidió la Resolución 0549 que reglamenta los porcentajes mínimos de ahorro en energía y agua para nuevas edificaciones según características y restricciones establecidas en dicha resolución. Asimismo, este Ministerio junto con la Unidad de Planeación Minero Energética – UPME, avanzan en la construcción del Reglamento Técnico para la Eficiencia Energética en las Viviendas de Interés Social – RETEVIS[8]. Por su parte, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y el ICONTEC trabajan en el Sello Ambiental Colombiano para Edificaciones Sostenibles[9].

Para el cumplimiento de estas regulaciones, las empresas constructoras deben realizar cambios en la forma como diseñan sus edificaciones. Estos incluyen la integración de conceptos de diseño sostenible, metas de desempeño energético, nuevos actores y herramientas computacionales de apoyo. Todos estos cambios dan lugar al proceso de diseño de edificaciones con enfoque energético.

Con el objeto de establecer el escenario de uso de la herramienta metodológica propuesta en el Capítulo 6, se presenta a continuación una adaptación del proceso de diseño con enfoque energético aplicable a zonas tropicales como Bucaramanga. Esta

[8] El RETEVIS especificará las acciones necesarias para encaminar los procesos de vivienda de interés social en el uso racional y eficiente de la energía, definir parámetros, rangos, índices y métodos de cálculo y valoración de la eficiencia energética [104].
[9] El Sello Ambiental Colombiano para Edificaciones Sostenibles será una herramienta de certificación voluntaria del nivel de sostenibilidad en las edificaciones [105].

tiene en cuenta aspectos como actores, objetivos, herramientas de apoyo y fases. También se incluyen algunas generalidades del diseño energético relacionadas con factores condicionantes del desempeño energético en los edificios, y estrategias de ahorro energético aplicables a edificaciones en zonas tropicales.

1.1. PROCESO DE DISEÑO ENERGÉTICO

Un proceso de diseño con enfoque energético busca edificaciones de mejores calidades energéticas y ambientales a través de la definición de objetivos de desempeño en las primeras etapas del proceso, la inclusión de estrategias de ahorro de energía, y el uso de herramientas computacionales de vanguardia [30]. Sin embargo, el desconocimiento y falta de apropiación de estos aspectos en regiones tropicales, dificulta su aplicación en ciudades como Bucaramanga [31].

La descripción del proceso de diseño con enfoque energético presentada en este capítulo fue elaborada a partir de la estructura de un proceso de diseño convencional desarrollado por algunas de las empresas constructoras de mayor representatividad en el mercado de la construcción en Santander y que hacen parte del Clúster de la Construcción de la Cámara de Comercio de Bucaramanga.

Para que éste proceso de diseño tuviese un enfoque energético, fue necesario realizar su adaptación según recomendaciones contenidas en las guías de diseño integrado de la *International Energy Agency* [30]*, The American Institute of Architects* [32], y en las guías de diseño avanzado de la *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers – ASHRAE* [33]–[39].

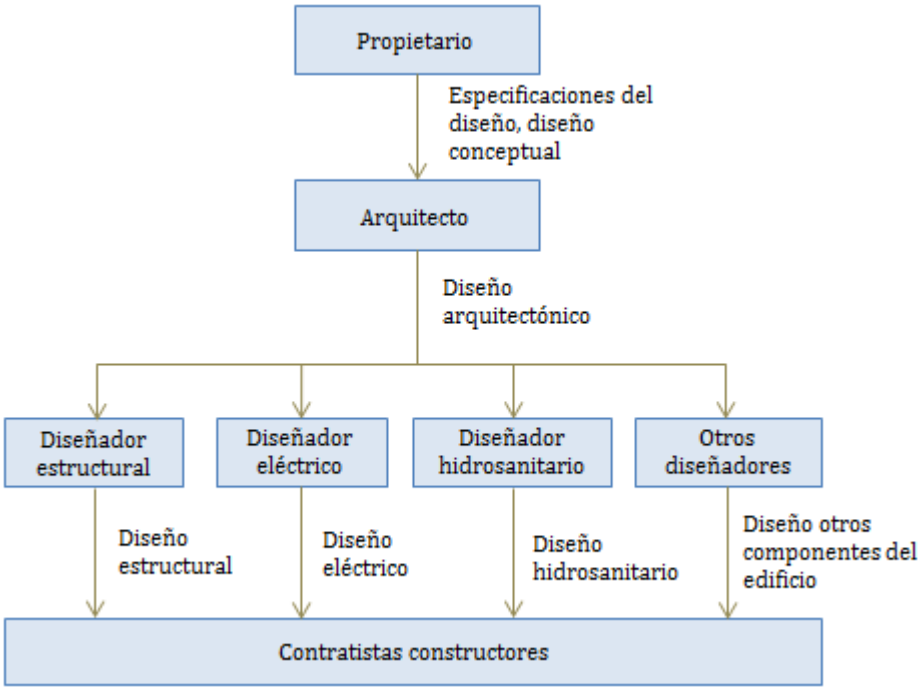
A pesar de las limitaciones que representa el uso del proceso de diseño típico de edificaciones de Bucaramanga como insumo de la adaptación presentada del proceso de diseño con enfoque energético, se considera que dicha adaptación puede ser representativa de la zona tropical dada la importancia de las empresas consideradas y del sector de la construcción de Bucaramanga.

A continuación se describen aspectos del proceso de diseño con enfoque energético como actores involucrados, objetivos y fases que lo componen.

1.1.1. Actores

Un proceso de diseño convencional como el que desarrollan la mayoría de las empresas constructoras de Bucaramanga presenta una estructura jerárquica como la mostrada en la Figura 3. El propietario designa a un arquitecto la responsabilidad del diseño de la edificación; posteriormente, consultores estructurales, electricistas, e hidrosanitarios apoyan el diseño de los principales sistemas de la edificación [30], [40].

Figura 3. Organización de los actores en un proceso de diseño convencional.



En el caso del proceso de diseño con enfoque energético, los actores deben estar dispuestos a una participación más activa y colaborativa desde etapas tempranas del proceso [30], [40], [41]. Esto da lugar a una estructura circular como la mostrada en la Figura 4 que incluye actores como especialistas en simulación energética y diseño verde, entre otros, según las capacidades y conocimientos interdisciplinares de los demás actores del equipo de diseño [42], [43].

Como resultado de esta organización se logra un mejoramiento de las calidades energéticas y ambientales del edificio, así como la oportunidad de influir a tiempo en la solución de los problemas y dificultades a lo largo del proceso de diseño [30].

Figura 4. Organización de los actores en un proceso de diseño con enfoque energético. Adaptada de [37].

La Tabla 5 resume las funciones más importantes que desempeñan los actores de un proceso de diseño con enfoque energético.

Tabla 5. Funciones de los actores en el proceso de diseño con enfoque energético.

Actor	Funciones
Propietario	- Establecimiento de los requerimientos del proyecto incluyendo los objetivos de desempeño energético y ambiental. - Toma de decisiones. - Verificación constante de objetivos y metas del proyecto.
Arquitecto	- Generación de las propuestas arquitectónicas de diseño conceptual, y diseño esquemático que tienen en cuenta los requerimientos del propietario, así como las metas de desempeño energético y ambiental.
Especialista en simulación energética	- Evaluación de estrategias de diseño para confirmar su alineación con los objetivos de diseño. - Evaluación de los esquemas de diseño conceptual y esquemático con respecto a objetivos de diseño. - Optimización y análisis de los sistemas del edificio. - Evaluación del desempeño energético final del edificio.
Especialista en diseño verde	- Identificación de condiciones bases aprovechables y mitigables del sitio del proyecto. - Apoyar el establecimiento de objetivos de desempeño energético y ambiental.

	- Identificación y selección de estrategias de diseño aplicables. - Acompañamiento en el diseño de soluciones arquitectónicas que permitan el cumplimiento de los objetivos de diseño.
Diseñadores (estructural, eléctrico, hidrosanitario y otros).	- Identificación de los sistemas que están alineados con los objetivos de diseño. - Dimensionamiento de los sistemas de la edificación. - Obtención de documentos para la fase de construcción.

1.1.2. Objetivos

En un proceso de diseño con enfoque energético se realiza una definición temprana de los objetivos, a fin de direccionarlo. Dichos objetivos deben ser específicos, medibles, alcanzables, realistas, y de tiempo limitado. La Tabla 6 presenta los principales objetivos de un proceso de diseño con enfoque energético. Éstos se encuentran asociados a cuatro categorías: energía, ambiente, comodidad y economía.

Tabla 6. Principales objetivos del proceso de diseño con enfoque energético. Adaptado de [44].

Categoría	Objetivos
Energía	- Reducción del consumo energético durante la operación del edificio. - Inclusión de fuentes de energía renovable. - Certificación energética del edificio. - Cumplimiento con normativas (Resolución 0549).
Ambiente	- Reducción de las emisiones de gases contaminantes. - Reducción de impactos ambientales asociados al ciclo de vida del edificio. - Reducción del consumo de agua. - Certificación ambiental. - Cumplimiento con normativas.
Comodidad	- Confort térmico. - Confort visual. - Confort acústico. - Funcionalidad del edificio.
Economía	- Reducción de costo financiero del proyecto. - Reducción de costos de operación y mantenimiento del edificio.

1.1.3. Herramientas computacionales de apoyo

Existen dos grupos principales de herramientas computacionales que apoyan el proceso de diseño: herramientas de modelado y herramientas de análisis [45]. Las herramientas de modelado permiten representar gráficamente el diseño de una edificación así como la información más relevante asociada a esta a través de planos

2D y modelos 3D. Dentro de este grupo se encuentran la mayoría de herramientas del tipo CAD[10] entre las que se destacan AutoCAD, ArchiCAD, Revit, y Google SketchUp.

Por su parte, las herramientas de análisis son usadas para la evaluación del diseño de una edificación con respecto al uso de energía, confort interior, impactos ambientales y costos [45]. Esto hace que sirvan de soporte para la toma de decisiones a través de todo el proceso de diseño [42].

Dentro de las herramientas computacionales de análisis se encuentran las herramientas de simulación energética; éstas son comúnmente usadas para el cálculo de cargas del edificio, selección y dimensionamiento del sistema HVAC, análisis paramétricos y de optimización, cuantificación de la demanda energética, estudio de estrategias de ahorro energético, análisis de iluminación natural, verificación del cumplimiento de la edificación con respecto a estándares, análisis de confort térmico y visual y análisis computacional de fluidos (CFD), entre otros [7], [26], [46], [47]. La Tabla 7 muestra los usos más comunes de las HSE en las diferentes fases del proceso de diseño de edificaciones.

Tabla 7. Usos de las HSE en las diferentes fases del proceso de diseño.

Pre-diseño y Diseño conceptual	Diseño esquemático	Desarrollo del diseño
- Análisis de condiciones climáticas del sitio, trayectoria solar y radiación. - Análisis de la forma, sombreamiento y envolvente. - Cuantificación preliminar del consumo energético.	- Optimización de la forma, orientación y aislamiento de la envolvente. - Cuantificación de las cargas de refrigeración. - Análisis de estrategias de iluminación natural y de climatización.	- Optimización del diseño y los sistemas del edificio (aislamiento, acristalamiento, otros). - Integración de estrategias pasivas con los sistemas del edificio. - Evaluación energética y ambiental del proyecto.

Actualmente, existe un gran número de herramientas de simulación energética, el Departamento de Energía de Estados Unidos referencia más de 400 en su directorio web. Crawley et al. (2006) destaca un grupo de herramientas de simulación energética comúnmente usadas para análisis térmico y energético de edificaciones entre las que se encuentran BSim, DeST, DOE 2.1, Ener-Win, Energy-10, EnergyPlus, eQUEST,

[10] Sigla en inglés para diseño asistido por computador.

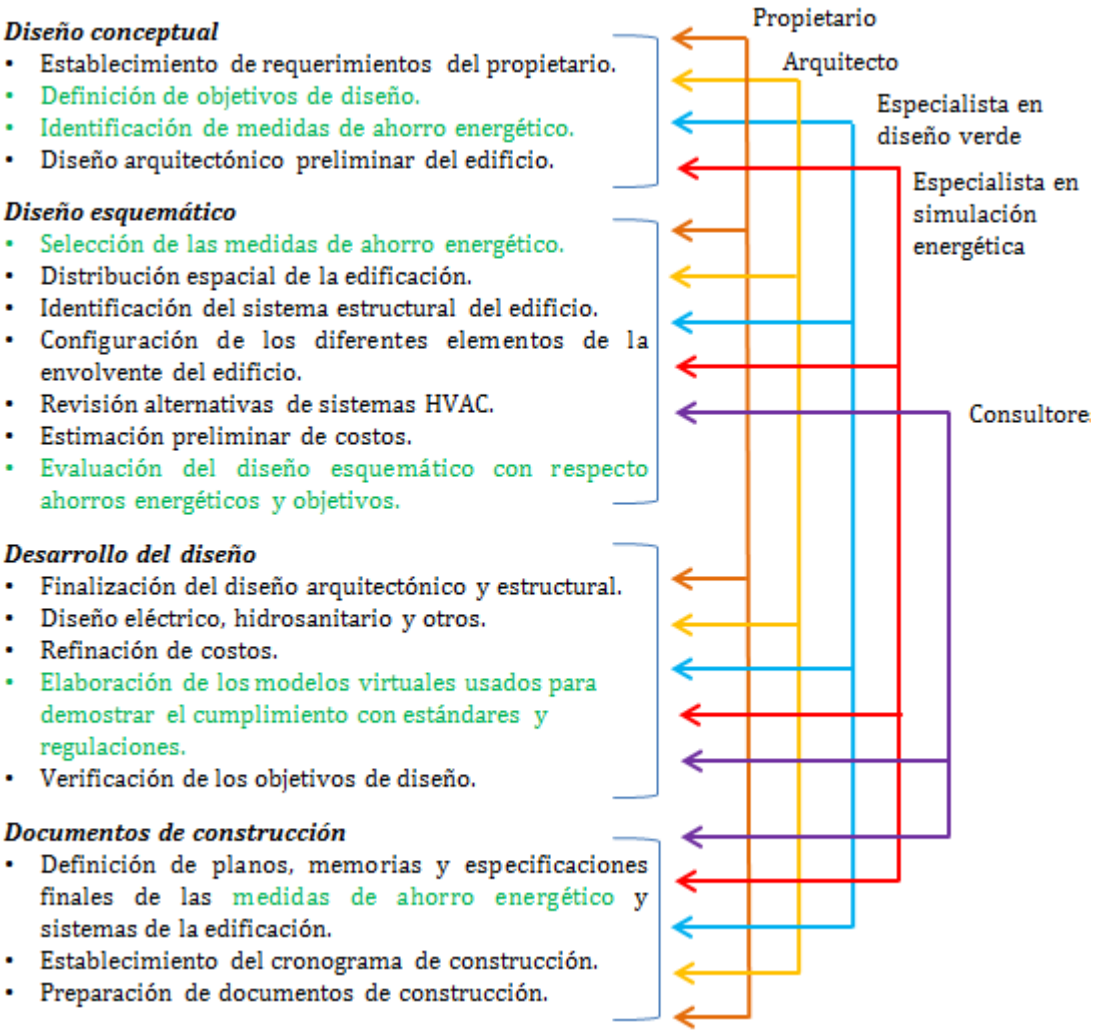
ESP-r, IDA ICE, IES VE, HAP, HEED, SUNREL, Tas, TRACE y TRNSYS, entre otras [27].

Según los resultados de una encuesta de caracterización del proceso de diseño de edificaciones realizada en 2015 por la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones de la UIS a un grupo de representantes de empresas y organizaciones locales del sector de la construcción interesadas en el diseño verde, en la ciudad de Bucaramanga, es común el uso de herramientas de modelado tipo CAD como AutoCAD y ArchiCAD como apoyo al proceso de diseño. Por el contrario, se identificó que un 79% de los encuestados desconocen las herramientas de simulación energética y su uso dentro del proceso de diseño. La ficha y los principales hallazgos de esta encuesta son mostrados en el Anexo A.

1.1.4. Fases

La Figura 5 presenta el esquema general de un proceso de diseño con enfoque energético aplicable a zonas tropicales, el cual se compone de cuatro fases: diseño conceptual, diseño esquemático, desarrollo del diseño y documentos de construcción. Para su obtención se realizó la adaptación de un proceso de diseño típico de edificaciones desarrollado en la ciudad de Bucaramanga a través de la inclusión de actividades relacionadas con el diseño energético (actividades en color verde).

Figura 5. Esquema general de un proceso de diseño con enfoque energético.



A continuación se describen en detalle cada una de las fases que componen el proceso de diseño con enfoque energético.

- **Fase de diseño conceptual**

La Tabla 8 resume de las tareas, actores, resultados y documentación de la fase de diseño conceptual. Esta fase tiene la finalidad de establecer la información preliminar alrededor del proceso de diseño. Inicialmente se deben establecer los requerimientos del propietario del proyecto. Posteriormente, con ayuda de actores como los especialistas en diseño verde y en simulación energética se desarrollan actividades como el establecimiento de los objetivos de diseño, y la identificación de las medidas de ahorro energético aplicables al proyecto de diseño.

Las principales temáticas que deben ser abordadas por los actores de esta fase están relacionadas con las condiciones del sitio, disponibilidad de recursos naturales, condiciones climáticas imperantes y situación de edificaciones circundantes, entre otros.

Tabla 8. Descripción de la fase de diseño conceptual.

Fase de diseño conceptual	
Actividades claves	• Selección del sitio de ubicación de la edificación. • Identificación de interesados. • Identificación de las condiciones ecológicas y climáticas bases del sitio y análisis de su futura influencia sobre la edificación. • Establecimiento de los objetivos de diseño (áreas de energía, ambiente, comodidad, economía). • Identificación de estrategias de ahorro energético, cuidado ambiental y confort interior apropiadas para el proyecto. • Generación del diseño arquitectónico preliminar del edificio. • Confirmación de la alineación del diseño arquitectónico preliminar con los objetivos de diseño
Actores	• Propietario. • Arquitecto. • Especialista en diseño verde. • Especialista en simulación energética.
Resultados y documentación	• Documento de las estrategias de diseño identificadas. • Desarrollo del mapa de ruta del proceso de diseño que identifique responsabilidades, entregables y fechas. • Documento con los requerimientos de los propietarios del proyecto. • Documento de los objetivos del proyecto.

- **Fase de diseño esquemático**

La Tabla 9 presenta el resumen de las tareas, actores, resultados y documentación de la fase de diseño esquemático. El objetivo principal de esta fase es la selección de las estrategias de diseño que propenden por el cumplimiento de los objetivos definidos en la fase anterior. Estas estrategias deben ser desarrolladas según las habilidades y conocimientos del todo el equipo de diseño, que en esta oportunidad incluye a los consultores de las áreas de diseño estructural, eléctrico e hidrosanitario, entre otros.

Para la selección de las estrategias de diseño deben ser considerados aspectos como el costo adicional inicial, el ahorro energético anual proyectado, costo de mantenimiento, retorno de la inversión, ahorros en las emisiones de carbono, puntos LEED alcanzables y mantenimiento del confort térmico de los usuarios, entre otros.

Como resultado de la interacción de los actores se obtiene la forma y la orientación definitiva de la edificación, la definición de la envolvente y sus componentes, el análisis de estrategias de iluminación natural y protecciones solares, así como una versión preliminar de los sistemas HVAC.

Tabla 9. Descripción de la fase de diseño esquemático.

Fase de diseño esquemático	
Actividades claves	• Selección de las estrategias de ahorro energético. • Identificación de los sistemas estructurales y de revestimiento del edificio y sus implicaciones para la envoltura térmica. • Identificación de la estrategia de acabados interiores y sus implicaciones en las estrategias de iluminación y distribución de aire. • Selección de la orientación definitiva de la edificación y el tipo de fachada. • Identificación de estrategias de acristalamiento y definición de propiedades de superficies opacas. • Configuración de la forma, pendiente y materiales de la cubierta, así como estrategias para la mitigación de ganancias solares. • Revisión de alternativas de sistemas HVAC. • Evaluación del diseño esquemático con respecto a ahorros energéticos y objetivos. • Estimación preliminar de costos.
Actores	• Propietario. • Arquitecto. • Especialista en diseño verde. • Especialista en simulación energética. • Consultores (diseñador estructural, diseñador eléctrico, diseñador hidrosanitario y otros). • Proveedores.
Resultados y documentación	• Ajuste del mapa de ruta del proceso, incluyendo tareas e impactos que han emergido de esta etapa del proceso de diseño. • Finalización de aspectos como la forma, la orientación, edificaciones adyacentes, sombreamiento y dispositivos de protección solar, selección y diseño de los sistemas más importantes, estimación de costos, entre otros.

- **Fase de desarrollo del diseño**

La Tabla 10 resume las tareas, actores, resultados y documentación de la fase de desarrollo del diseño. Ésta permite concretar y validar las alternativas de diseño analizadas en la fase anterior que fueron aprobadas por el propietario. Los sistemas arquitectónicos, estructurales, eléctricos e hidrosanitarios son finalizados y evaluados

teniendo en cuenta el desempeño esperado y su impacto en el resto de la edificación, así como en los objetivos de diseño propuestos [43].

En esta fase se hace uso intensivo de las herramientas de simulación energética para actividades como la evaluación de tecnologías de construcción verde como sistemas híbridos de iluminación y climatización, y la evaluación del desempeño final del edificio en relación con los objetivos de diseño [43], [48]. Al finalizar esta fase, el diseño de la edificación debe estar terminado.

Tabla 10. Descripción de la fase de desarrollo del diseño.

Fase de desarrollo del diseño	
Actividades claves	• Finalización del diseño arquitectónico y estructural. • Optimización de los sistemas a través de simulaciones detalladas. • Desarrollo del diseño eléctrico, hidrosanitario y otros. • Refinación de costos. • Validación del logro de los objetivos de diseño. • Elaboración de los modelos virtuales usados para demostrar el cumplimiento con estándares y regulaciones. • Retroalimentación del contratista constructor.
Actores	• Propietario. • Arquitecto. • Especialista en diseño verde. • Especialista en modelado energético. • Consultores (Ingeniero Mecánico, Electricista, Civil, entre otros). • Proveedores • Contratista.
Resultados y documentación	• El diseño de la edificación está finalizado. • Todos los sistemas de la edificación se encuentran definidos. • Informe del desempeño energético final. • Catálogo de materiales de construcción y calculo coste final.

- **Fase de documentos de construcción**

El resumen de las tareas, actores, resultados y documentación de la fase de diseño conceptual es presentado en la Tabla 11. Los documentos de construcción se preparan sobre la base de los documentos de la fase de desarrollo del diseño que fueron aprobados, así como los cálculos finales y las especificaciones [43]. En esta fase se realiza el establecimiento de los documentos de diseño en forma detallada, incluyendo planos y especificaciones necesarios para iniciar la construcción de la edificación.

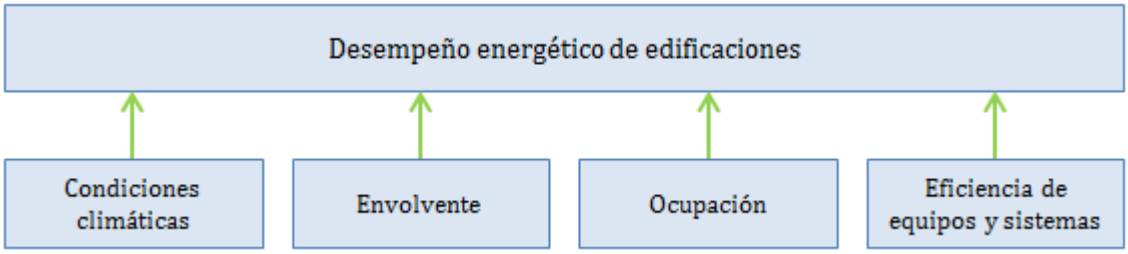
Tabla 11. Descripción de la fase de documentos de construcción.

Fase de documentos de construcción	
Tareas claves	• Definición de planos, memorias y especificaciones finales de las medidas de ahorro energético y sistemas de la edificación. • Establecimiento del cronograma de construcción. • Preparación de documentos de construcción
Actores	• Propietario. • Arquitecto. • Especialista en diseño verde. • Especialista en modelado energético. • Consultores (Ingeniero Mecánico, Electricista, Civil, entre otros). • Proveedores • Contratista.
Resultados y documentación	• Descripción exhaustiva del proyecto separado por oficios de construcción y disciplinas, teniendo en cuenta los requisitos de construcción, programación y procedimientos. • Informe sobre desempeño energético y ambiental. • Especificaciones para la construcción y operación de las estrategias de ahorro energético, cuidado ambiental y confort térmico. • Programa de construcción definido en un alto nivel de precisión.

1.2. FACTORES CONDICIONANTES DEL DESEMPEÑO ENERGÉTICO DE LAS EDIFICACIONES EN EL TRÓPICO

El desempeño energético indica la calidad de un edificio en cuanto al uso de la energía [49]. La Figura 6 muestra los cuatro factores principales que influyen en el desempeño energético de edificaciones ubicadas en el trópico [50].

Figura 6. Factores influyentes en el desempeño energético de edificaciones en climas tropicales.



Condiciones climáticas como la temperatura exterior, la humedad relativa, la radiación solar afectan el desempeño energético de las edificaciones localizadas en regiones tropicales como la ciudad de Bucaramanga [28], [51]. La incidencia de estos factores

sobre los distintos componentes de la edificación puede causar situaciones de disconfort térmico y visual, así como elevados consumos de energía eléctrica en los casos en que se dispone de sistemas de climatización artificial.

La envolvente condiciona el desempeño energético de las edificaciones en clima tropical, ésta actúa como el control principal del consumo de energía en refrigeración y juega un rol importante en la satisfacción de las necesidades de confort de los ocupantes [50]. Entre mayor es la capacidad de aislamiento de la envolvente menor es la afectación que el clima exterior ocasiona sobre su desempeño energético [52]. Por lo tanto, las propiedades térmicas de los materiales de construcción de la envolvente determinan la capacidad de transferencia de calor al interior de los espacios y la variación de la temperatura interior del aire [1].

La tasa de ocupación del edificio influencia de forma directa sobre el desempeño energético de las edificaciones, ya que esta determina en buena medida la demanda energética por refrigeración y es un indicador del número de aparatos que se encuentran al interior de los espacios. El comportamiento de los habitantes de una edificación influye directamente en el uso de los sistemas de iluminación y climatización de un edificio, dos de los principales sectores de consumo energético en una edificación [50].

Finalmente, el consumo energético de los sistemas que representan la mayor parte del consumo final de la edificación (climatización e iluminación) puede ser reducido a través de la instalación de componentes eficientes tales como equipos de refrigeración de alto coeficiente de rendimiento, variadores de velocidad, lámparas ahorradoras o sistemas de control automatizados. Estas acciones mejoran notablemente el desempeño energético de una edificación.

1.3. ESTRATEGIAS DE AHORRO ENERGÉTICO

Las estrategias de ahorro energético son acciones que se toman para reducir el consumo de energía en las edificaciones. Éstas pueden ser implementadas durante todo el ciclo de vida de un edificio; sin embargo, producirán un mayor impacto cuando son definidas en el proceso de diseño [53].

En el caso de edificaciones tropicales, las estrategias de ahorro energético se enfocan hacia la mitigación de ganancias solares, el aprovechamiento de las condiciones ambientales del medio (ventilación e iluminación natural), energías renovables y el mejoramiento de la eficiencia energética de los sistemas de la edificación (estrategias activas).

La Tabla 12 presenta una recopilación de estrategias de ahorro energético que han sido identificadas en diversas guías de construcción sostenible aplicables en su mayoría al entorno tropical, tal como el Manual de Diseño de Edificaciones Energéticamente Eficientes en el Trópico [53], la Guía de Construcción Sostenible para el Ahorro de Energía y Agua en las Edificaciones (Anexo 1 de la Resolución 0549) [54], la Cartilla del Ministerio de Vivienda de Criterios Ambientales para el Diseño y Construcción de Vivienda Urbana [13], La Guía de Ahorro y Eficiencia Energética en Oficinas del Fondo Mundial para la Naturaleza de España [55], entre otros documentos. La descripción en detalle de cada una de las estrategias es presentada en el Anexo B.

Tabla 12. Recopilación de estrategias de ahorro energético.

Grupo	Estrategias
Mitigación de las ganancias solares	• Aprovechamiento del contexto urbano y ambiental existente. • Omisión de techos horizontales. • Uso de materiales reflectantes. • Uso de materiales aislantes. • Cámaras de ventilación. • Omisión de techos o cerramientos horizontales de vidrio expuestos al sol. • Mitigación de la radiación solar en las paredes. • Mejoramiento de la inercia térmica de los cerramientos. • Uso de materiales aislantes. • Variación del ángulo de inclinación del acristalamiento en fachadas acristaladas. • Fachadas de doble acristalamiento. • Uso limitado de ventanas en fachadas oriente y occidente. • Uso de protecciones solares. • Orientación de las ventanas. • Ubicación de los espacios refrigerados. • Análisis de la relación ventana –pared. • Cubierta verde.
Ventilación natural	• Orientación de la edificación. • Utilización de volúmenes en la fachada para estimular la circulación del aire. • Ubicación de las aberturas en los espacios. • Ubicación de las aberturas.

	• Aberturas en techos.
Iluminación natural	• Posición de las aberturas. • Organización de los ambientes interiores. • Acabados de buena reflexión. • Aberturas en los techos. • Bandejas de luz. • Control de la iluminación natural.
Energía solar	• Energía solar fotovoltaica. • Energía solar térmica.
Otras	• Uso de equipos eléctricos eficientes. • Integración de la iluminación natural con artificial. • Sistemas de iluminación zonificados. • Iluminación eficiente. • Economizadores de aire. • Coeficiente de desempeño. • Variadores de velocidad. • Mejoramiento del factor de potencia.

El principal resultado de este capítulo consistió en la identificación de las características más relevantes de un proceso de diseño con enfoque energético aplicable al trópico. Ésta fue realizada a partir de la adaptación del proceso de diseño convencional de edificaciones desarrollado en Bucaramanga según recomendaciones de algunas de las guías de diseño integrado más representativas.

De acuerdo con los resultados presentados, un proceso de diseño con enfoque energético aplicable al trópico presenta las mismas fases de un proceso de diseño convencional (Diseño conceptual, Diseño esquemático, Desarrollo del diseño y Generación de documentos). Las principales diferencias radican en la definición temprana de objetivos de desempeño ambiental y energético, la inclusión en el equipo de diseño de actores especializados en diseño verde y el uso de HSE como soporte para la toma de decisiones y la evaluación de los diseños. La inclusión de estos aspectos en un proceso de diseño convencional permitirá la obtención de edificaciones de mejores calidades ambientales y energéticas.

Teniendo en cuenta los requerimientos de cada fase del proceso de diseño con enfoque energético se establece que la herramienta metodológica propuesta en el Capítulo 6 puede ser usada en la evaluación energética del diseño llevada a cabo en la fase de Desarrollo del diseño.

2. SELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN ENERGÉTICA

Posterior a la identificación de las características del proceso de diseño con enfoque energético que permitió la determinación del escenario de uso de la herramienta metodológica propuesta en el Capítulo 6, se procedió a realizar la selección de la HSE a utilizar para la obtención de los resultados útiles en el establecimiento del desempeño energético de tres edificaciones. Dicha selección consistió en tres fases: Búsqueda de herramientas de simulación aplicables al trópico (Sección 2.1), identificación de criterios para la evaluación de las HSE preseleccionadas (Sección 2.2) y evaluación de las HSE preseleccionadas (Sección 2.3).

2.1. HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN ENERGÉTICA PRESELECCIONADAS

Para la búsqueda de las cuatro herramientas de simulación energética preseleccionadas (número definido en el alcance del trabajo de investigación) se consideraron las bases de datos que pueden ser accedidas desde los servicios de búsqueda de Elsevier, Web of Science, Google Scholar, y Scopus, así como las librerías especializadas en simulación energética de la International Building Performance Simulation Association - IPBSA[11]. En total, se tuvo en cuenta 100 artículos científicos que presentan investigaciones en las cuales se usó herramientas de simulación energética para el análisis de edificaciones en clima tropical.

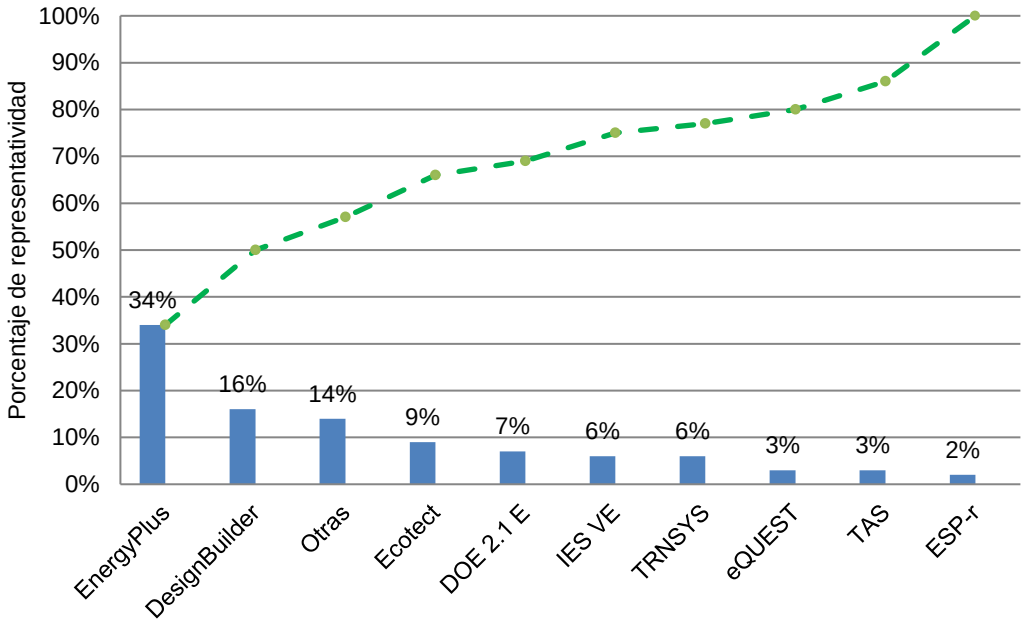
Posteriormente, se realizó un análisis de los artículos considerando aspectos como la herramienta de simulación energética empleada y el año de publicación. A partir de dicho análisis fue posible identificar las herramientas de simulación energética más utilizadas en el entorno tropical.

Como resultado del análisis mencionado anteriormente, se presenta en la Figura 7 la distribución en el uso de las herramientas de simulación energética. De acuerdo con ésta, las HSE de mayor representación son EnergyPlus (34%), DesignBuilder[12] (16%), Ecotect (9%) y DOE 2.1E (7%), que en conjunto representan el 66%. Estas HSE

[11] Las palabras claves empleadas en ambos casos fueron “Building energy simulation in tropical climate, humid-warm climate, hot-humid climate” y sus variaciones.
[12] Interfaz gráfica más conocida para el motor de simulación de EnergyPlus.

fueron usadas mayormente para análisis del comportamiento energético de distintos tipos de edificaciones y para el análisis de estrategias de ahorro energético relacionadas con elementos de protección solar, ventilación natural e iluminación natural. Dentro del grupo de otras HSE se encuentran Visual DOE, OpenStudio, Radiance, ENVI-MET, N3S CFD, DAYSIM, FLUENT y LUMINA.

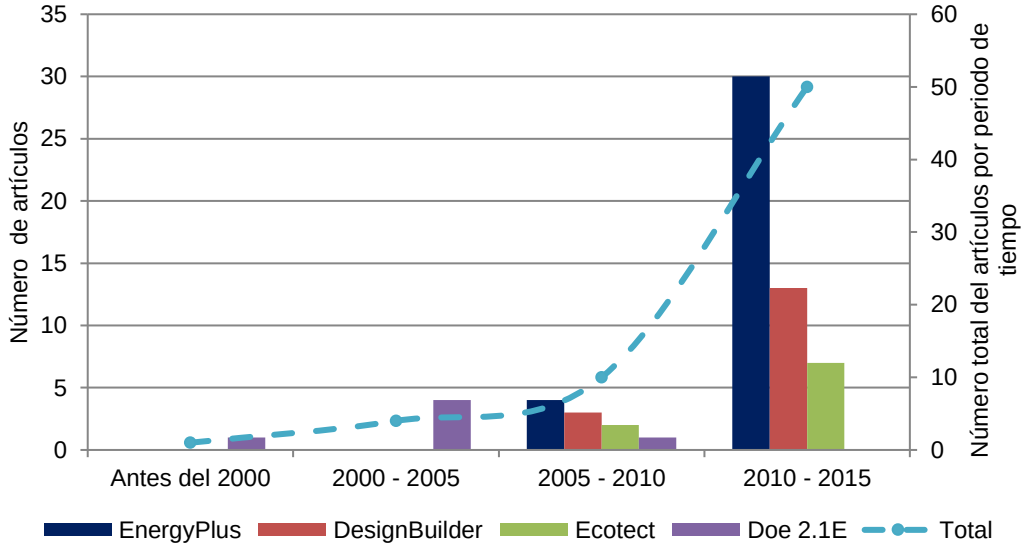
Figura 7. Frecuencia de uso de las herramientas de simulación energética según muestra de artículos científicos.



La Figura 8 presenta la distribución anual del uso de las herramientas más utilizadas en los últimos 15 años. De acuerdo con ésta, herramientas como EnergyPlus, DesignBuilder, y Ecotect presentan una tendencia creciente en su uso; caso contrario ocurre con DOE 2.1 E debido al surgimiento de una nueva versión llamada eQUEST, cuya representación conjunta es solo del 9%.

Teniendo en cuenta lo anterior, se preseleccionan cuatro herramientas de simulación energética de uso frecuente en el entorno tropical: EnergyPlus, DesignBuilder, Ecotect, y eQUEST. El Anexo C presenta una descripción de estas herramientas.

Figura 8. Distribución en el tiempo del uso de las herramientas de simulación energética con mayor frecuencia de uso.



2.2. IDENTIFICACIÓN DE CRITERIOS PARA LA EVALUACIÓN DE LAS HSE PRESELECCIONADAS

La selección de la herramienta de simulación energética usada para la obtención de los resultados útiles en el análisis y establecimiento del desempeño energético de edificaciones tropicales se realizó considerando un conjunto de criterios identificados a partir de una revisión bibliográfica.

Tras la revisión bibliográfica se encontraron algunos artículos científicos ([10], [56], [57],) que presentan criterios tenidos en cuenta por arquitectos e ingenieros cuando se selecciona una herramienta de simulación energética.

Attia *et al*. (2010) [56] realiza una recopilación de varias investigaciones relacionadas con criterios de selección de HSE y analiza los resultados de una encuesta sobre criterios de selección realizada a 445 arquitectos y 453 ingenieros. Como resultado de su investigación se identifican como relevantes i) la facilidad de uso y administración de la información en la interfaz, ii) la capacidad para dar soporte a decisiones de diseño, iii) la capacidad para simular edificaciones con componentes complejos y iv) la interoperabilidad y la integración al proceso de diseño.

Por su parte Weytjens *et al.* (2012) [57] sugiere criterios como la eficiencia de las entradas y la calidad de las salidas, la facilidad de navegación en la interfaz, la usabilidad en el proceso de diseño, la curva de aprendizaje, el tiempo de simulación y la pertinencia de la HSE para el uso local [10].

Un estudio comparativo entre dos herramientas realizado por Rallapalli (2010) [10] recomienda aspectos relacionados con la usabilidad, funcionalidad, confiabilidad y documentación tales como la accesibilidad, curva de aprendizaje, documentación de apoyo, intercambio de datos con otras herramientas, capacidades de modelado, tiempo de simulación, medidas de eficiencia energética analizables, modelado HVAC, la inclusión de cálculos sub-horarios y el reporte de los resultados [10].

La ASHRAE, por el contrario, recomienda que el criterio más importante para la selección de una herramienta de simulación es la capacidad de esta para lidiar con los requisitos del proyecto. Aunque también se consideran otros criterios como la complejidad de las entradas, la calidad de las salidas y otras capacidades auxiliares de la HSE [58].

Para la selección de la HSE a emplear en la cuantificación de los resultados útiles en el establecimiento del desempeño energético de edificaciones tropicales se consideraron aquellos criterios de mayor importancia para los arquitectos e ingenieros encuestados en [56]. También su tuvieron en cuenta algunos criterios específicos relacionados con el uso de las HSE en entornos tropicales.

De esta manera, se eligieron un total de seis (6) criterios de selección:

- Usabilidad y gestión de la información en la interfaz.
- Soporte para la toma de decisiones de diseño.
- Capacidad para simular edificaciones con componentes complejos.
- Interoperabilidad.
- Pertinencia en el proceso de diseño de edificaciones en trópico.
- Representatividad del uso de la herramienta en el entorno tropical encontrada en la muestra de artículos científicos mencionada anteriormente.

No se realizó discriminación alguna en los pesos de los criterios de selección, debido a que se consideró que para el uso a dar a la HSE y para lograr reducir los requerimientos de experiencia y conocimiento de los usuarios todos los criterios de selección son igualmente importantes.

2.3. EVALUACIÓN DE LAS HSE PRESELECCIONADAS

Las HSE preseleccionadas fueron evaluadas a partir de la calificación de cada uno de los criterios de selección. Dicha calificación depende de la valoración del grado de implementación que en la HSE presenta un grupo de características que describen el criterio de selección.

Las características de los cuatro primeros criterios fueron adoptadas de [56] y [60]. Mientras que las características de los dos últimos criterios se determinaron teniendo en cuenta los usos más comunes dados a las HSE en la muestra de 100 artículos científicos analizada al comienzo de este capítulo, así como el respectivo número de artículos en los que se hacía referencia a una herramienta en específico. La Tabla 13 presenta la especificación de las características asociados a cada criterio.

Tabla 13. Desglose de características asociadas a los criterios de selección.

Criterio de selección	Características
Usabilidad y administración de la información en la interfaz	✓ Representación gráfica de los resultados de salida. ✓ Uso flexible y navegación sencilla en la interfaz. ✓ Representación gráfica de los resultados en análisis espaciales 3D. ✓ Representación gráfica de la geometría del edificio. ✓ Almacenamiento de datos flexible y uso personalizado de características. ✓ Introducción, revisión y modificación de sencilla de las entradas.
Soporte para la toma de decisiones de diseño	✓ Orientación en códigos y sistemas de cumplimiento (ASHRAE 90.1[13], LEED[14], otros). ✓ Base de datos de casos de estudio para la toma de decisiones.

[13] Estándar Estadounidense que provee los mínimos requerimientos para diseños energéticamente eficientes de edificaciones excepto edificaciones residenciales de baja altura [106].

[14] Sistema de evaluación, clasificación, y certificación ambiental y energética de edificaciones de oficina creado por el Green Building Council de Estados Unidos (USGBC). Actualmente de aplicación internacional, incluido Colombia [76].

	✓ Valores por defecto para facilitar la entrada de los datos. ✓ Bibliotecas extensas de datos climáticos, componentes y sistemas. ✓ Creación de reportes alternativos para múltiples alternativas de diseño. ✓ Ayuda online y cursos de entrenamiento a sus usuarios. ✓ Posibilidad de análisis energéticos rápidos que soportan la toma de decisiones. ✓ Soporte para análisis de sensibilidad e incertidumbre de parámetros de diseño calve. ✓ Uso en todas las fases de diseño. ✓ Validación de la herramienta.
Capacidad para simular edificaciones con componentes complejos	✓ Simulación de estrategias de diseño complejas. ✓ Simulación de sistemas de energía renovable. ✓ Evaluación de emisiones relacionadas con el uso de energía en los edificios. ✓ Soporta varios tipos de sistemas HVAC. ✓ Simulación de diferentes tipos de edificaciones.
Interoperabilidad	✓ Intercambio de modelos con paquetes 3D (Sketch-Up, otros). ✓ Intercambio de modelos con paquetes CAD. ✓ Intercambio de modelos con paquetes MEP.
Pertinencia en el proceso de diseño de edificaciones en la zona tropical	✓ Análisis de ganancias térmicas. ✓ Análisis de confort térmico. ✓ Modelado y análisis de dispositivos de sombreado. ✓ Modelado y análisis de estrategias de ventilación natural. ✓ Modelado y análisis de estrategias de iluminación natural.
Representatividad del uso en entornos tropicales	✓ Número de artículos científicos en los que es usada la herramienta.

El grado de implementación que en la HSE presentan las características que describen los criterios de selección fue calificado asignando un puntaje entre uno (1) y cinco (5), teniendo en cuenta la escala de puntos mostrada en la Tabla 14.

Tabla 14. Escala de puntos usada para la calificación de las características asociadas a los criterios de selección.

Puntaje	Significado
1	La herramienta no incluye esta característica.
2	La herramienta incluye parcialmente esta característica.
3	La herramienta incluye esta característica.
4	La herramienta incluye esta característica de forma ágil y sencilla.
5	La herramienta incluye esta característica y ofrece un valor agregado.
N/A	La característica no aplica en la herramienta.

En la asignación de los puntajes de las características que describen los criterios de selección se consideraron algunos artículos científicos que tienen como temática la comparación entre herramientas de simulación energética [10], [26], [56], [60]–[62]. También se tuvo en cuenta la información de soporte de las herramientas preseleccionadas disponible en la web y la experiencia del grupo de investigación GISEL de la E3T en la apropiación de HSE. La Tabla 15 presenta la versión de las HSE preseleccionadas cuando se realizó la evaluación mediante los criterios de selección. Este dato es importante debido a que es común encontrar cambios significativos en las características de diferentes versiones de una misma HSE.

Tabla 15. Versiones de las herramientas de simulación preseleccionadas.

Herramienta	Versión
EnergyPlus	Versión 8.3
DesignBuilder	Versión 3.4
eQUEST	Versión 3.65
Ecotect	Ecotect Analysis 2011.

El detalle de la calificación de los criterios de selección y sus respectivas características es presentado en el Anexo D. La Tabla 16 presenta la calificación obtenida por las HSE para cada criterio de selección, así como la calificación final correspondiente.

Tabla 16. Calificación de los criterios de selección.

Criterio	DesignBuilder	EnergyPlus	eQuest	Ecotect
Usabilidad y administración de la información en la interfaz	3,7	2,2	2,5	3,5
Soporte para la toma de decisiones de diseño	3,4	3,3	2,7	2,4
Capacidad para simular edificaciones con componentes complejos	3,2	3,4	2,2	2,2
Interoperabilidad	3,3	2,7	1,0	2,3
Pertinencia en el proceso de diseño de edificaciones en el trópico	3,8	3,4	2,0	3,0
Representatividad en el uso en entornos tropicales	3	4	1	2
Calificación final	**3,4**	**3,2**	**1,9**	**2,6**

La calificación final de cada HSE fue determinada como el promedio de las calificaciones de cada criterio de selección. De acuerdo con estos resultados DesignBuilder es la herramienta que presenta el mejor desempeño en el criterio de usabilidad (3,7) en comparación con las demás herramientas consideradas, esto se debe a que ésta permite la representación geométrica de la edificación, el uso flexible y navegación sencilla en su interfaz, así como la representación gráfica de los resultados. EnergyPlus presenta la peor calificación de este criterio (2,2) debido principalmente a la ausencia de una representación gráfica de la edificación y sus resultados. Esto ocasiona que los usuarios de esta herramienta se vean obligados al uso de interfaces complementarias que apoyen tareas como modelado virtual y la presentación de resultados tales como SketchUP y OpenStudio, entre otras.

En relación al soporte para la toma de decisiones de diseño, DesignBuilder (3,4) y EnergyPlus (3,3) presentan un desempeño destacado debido a la cantidad significativa de información *online* disponible para la asistencia de sus usuarios y la inclusión de bibliotecas extensas de datos climáticos, componentes y sistemas. De igual manera, dichas herramientas se encuentran validadas por varios test reconocidos internacionalmente[15]. Para el caso de eQUEST (2,7) y Ecotect (2,4), la falta de bases de datos de casos de estudio y la casi total ausencia de orientación en códigos de edificaciones y sistemas de cumplimiento determinó su bajo desempeño en este criterio.

La evaluación de la capacidad de la herramienta para simular edificaciones con componentes complejos evidenció en EnergyPlus (3,4) buenas capacidades para el modelado y simulación de estrategias de diseño complejas, evaluación de emisiones contaminantes, modelado de diferentes sistemas HVAC y la simulación de diferentes tipos de edificaciones. DesignBuilder (3,2) presenta un desempeño similar, aunque no incluye la simulación de sistemas de energía renovable.

Las mejores capacidades en la evaluación de la interoperabilidad fueron encontradas en DesignBuilder (3,3), esta herramienta soporta el intercambio de modelos con

[15] ANSI/ASHRAE Standard 140-2011, ASHRAE Research Project 1052, IEA BESTEST In-Depth Ground Coupled Heat Transfer Tests, IEA BESTEST Multi-Zone Non-Airflow In-Depth Tests, entre otros [107].

paquetes 3D y CAD. Caso contrario ocurre con eQUEST dado que solo tiene parcialmente implementadas las mencionadas características de intercambio.

DesignBuilder (3,8) se destaca en la evaluación de la pertinencia de las herramientas en el proceso de diseño de edificaciones en el trópico, principalmente por su soporte en el modelado y análisis de dispositivos de sombreado, estrategias de ventilación natural e iluminación natural, así como el análisis de ganancias y confort térmico. Por su parte eQUEST (2,0) es la herramienta con menor desempeño debido a la limitación de sus resultados. Al considerar la representatividad de la herramienta en el uso en entornos tropicales, se encontró una mayor frecuencia de uso en EnergyPlus (4) y DesignBuilder (3) en comparación con Ecotect (2) y eQUEST (1).

Teniendo en cuenta el desempeño que presentaron las HSE preseleccionadas en la evaluación por criterios de selección, se eligió a DesignBuilder como la herramienta de simulación energética a utilizar en la cuantificación de los resultados útiles requeridos para el establecimiento del desempeño energético de las edificaciones objeto de estudio.

Los principales hallazgos de este capítulo están relacionados con la selección de DesingBuilder como la HSE más pertinente para el análisis y evaluación energética de edificaciones tropicales. Para esto, se estableció una metodología compuesta por tres fases. Inicialmente, se realizó la identificación de un grupo de herramientas de uso común en el trópico según el análisis de una muestra representativa de artículos científicos; posteriormente, se configuro un grupo de criterios de selección teniendo en cuenta la opinión de los usuarios (arquitectos e ingenieros) de la HSE, así como los requerimientos propios del uso a darle; finalmente, se asignó una calificación a cada criterio de acuerdo con el grado de soporte que la HSE ofrece a un grupo de características que describen cada criterio. Dichas calificaciones estuvieron sustentadas en reportes científicos de comparación de HSE y en la experiencia del grupo de investigación GISEL de la E3T.

La calificación final de las HSE fue calculada como la suma promedio de las calificaciones asignadas a cada criterio de selección.

3. CREACIÓN DE LOS MODELOS VIRTUALES DE LAS EDIFICACIONES SELECCIONADAS

Este capítulo presenta el proceso de creación de los modelos virtuales de tres edificaciones, dos de tipo educativa y una de tipo residencial. A partir de éste, se espera identificar el procedimiento a seguir para el modelado virtual de una edificación en DesignBuilder.

Inicialmente, se presenta una breve descripción de las principales características de uso, construcción y equipos de cada edificación; luego, se procede a describir las fases seguidas para la obtención de los modelos virtuales.

3.1. DESCRIPCIÓN DE LAS EDIFICACIONES

Las edificaciones objeto de estudio se encuentran ubicadas en Bucaramanga; dos de éstas corresponden a edificaciones de tipo universitario (Edificio de Ingeniería Eléctrica – E3T y Edificio de Ingeniería Industrial – EEIE) y otra más tipo vivienda de interés social (Vivienda barrio la Feria IV etapa – VIS).

La selección de las edificaciones se basó en la disponibilidad de información relacionada con planos "*As – Built*", materiales, sistemas y horarios de ocupación. Ésta información fue obtenida en su mayoría de trabajos de grado previos[16]. La Tabla 17 presenta las características más generales de las edificaciones seleccionadas.

En relación con la configuración de los elementos constructivos, las edificaciones seleccionadas incluyen técnicas de construcción y materiales convencionales, tales

[16] Descripción del comportamiento energético de una vivienda de interés social; Julian Gutierréz & Anderson Mechan; 2014 [108].
Análisis energético del edificio de ingeniería eléctrica a partir del uso de la herramienta DesignBuilder: calibración y simulaciones; Carlos Caicedo, Alejandro Torres & Saúl Sánchez; 2015 [109].
Estimación del potencial impacto de la implementación de estrategias URE en iluminación y climatización en el edificio de estudios industriales y empresariales a partir de la herramienta eQUEST; Marlon Pinto, Jesús Roa & Brayan Roa; 2015 [103].
Análisis comparativo de simulación energética entre DesignBuilder y EnergyPlus; Cristian Villalba & Nixon Ortiz; 2016 [102]

como muros en ladrillo hueco, pantalla de concreto y drywall y placas entre piso en concreto aligerado. La Tabla 18 presenta un resumen de las principales características de los elementos constructivos que constituyen las edificaciones seleccionadas.

Tabla 17. Características generales de las edificaciones seleccionadas.

Característica	E3T	EEIE	VIS
Área aprox. [m^2]	2 700	6 700	46
Ocupación aprox. [Personas]	1 400	1 700	5
Tipos de espacio	Aulas de clase, oficinas, salas de estudio.	Aulas de clase, oficinas, auditorios, salas de estudio.	Espacios residenciales.
Número de pisos	5 y un sótano	5 y un sótano	2
Orientación fachada principal	Sur	Sur	Sur

Tabla 18. Descripción elementos constructivos que componen las edificaciones seleccionadas.

Elemento	Edificio E3T	Edificio EEIE	VIS
Muros exteriores e interiores	Drywall, ladrillo hueco recubierto de mortero y pantallas en concreto.	Ladrillo hueco recubierto de mortero y pantallas en concreto.	Ladrillo hueco expuesto.
Placas entrepisos	Placa de concreto macizas y placas de concreto aligeradas con casetón.	Placas en concreto macizas y placas en concreto aligeradas con casetón.	Placa de concreto aligerada con ladrillo.
Cubierta	Placa de concreto aligerada con casetón.	Placa en concreto aligerada con casetón.	Placa de concreto aligerada con ladrillo.

En cuanto a los acristalamientos, El edificio E3T presenta un área de ventanales cercana al 70 % de total de área de la fachada. Para el Edificio EEIE este valor está cerca del 40%. Mientras que en la edificación tipo VIS el área de ventanales es de aproximadamente el 30 %. Los tipos de vidrio más usados en estas edificaciones son de 3 mm de espesor de tipo incoloro (Edificio E3T y VIS), así como vidrios de tonalidad verde y tipo reflectivo de espesores de 3 mm y 4 mm (Edificio EEIE).

En los edificios E3T y EEIE existen sistemas de climatización artificial. En el Edificio E3T se cuenta con unidades independientes de climatización en algunos espacios, los demás son climatizados naturalmente. La edificación tipo VIS fue diseñada para

experimentar ventilación natural. La Tabla 19 presenta las características principales de los sistemas de climatización artificial de los edificios E3T y EEIE.

Tabla 19. Principales características de los sistemas de climatización de las edificaciones seleccionadas.

Característica	Edificio E3T	Edificio EEIE
Composición del sistema de climatización artificial	5 Unidades tipo FanCoil 3 Unidades tipo Split.	5 Sistemas DX de refrigerante variable.
Ubicación de los espacios climatizados	Sala profesores, Aulas del cuarto piso Algunos espacios quinto piso.	Acondicionan todo el edificio a excepción de áreas comunes y espacios de poca ocupación.

Un aspecto a destacar es la presencia de estrategias de ahorro de energía y agua en el Edificio E3T. Este cuenta con un área aproximada de 550 m^2 de cubiertas verdes y 23 tubos solares para iluminación natural cenital. De igual manera se incluyeron en su diseño algunas estrategias híbridas (combinación de medidas pasivas y activas) de iluminación y climatización. En relación con el ahorro en agua, se incluyeron estrategias como fluxómetros de doble descarga, aireadores y orinales secos.

3.2. MODELADO VIRTUAL

Posterior a la identificación y descripción de las edificaciones objeto de estudio, se realizó el modelo virtual de cada una de éstas usando la herramienta de simulación energética DesignBuilder. El proceso de modelado virtual de una edificación está compuesto por dos fases: modelado geométrico y asignación de datos al modelo geométrico.

3.2.1. Modelado geométrico

En la fase de modelado geométrico se realizó la representación 3D de las edificaciones. Dichos modelos fueron generados a partir de la edición de bloques, método empleado por DesignBuilder para el modelado geométrico de edificaciones.

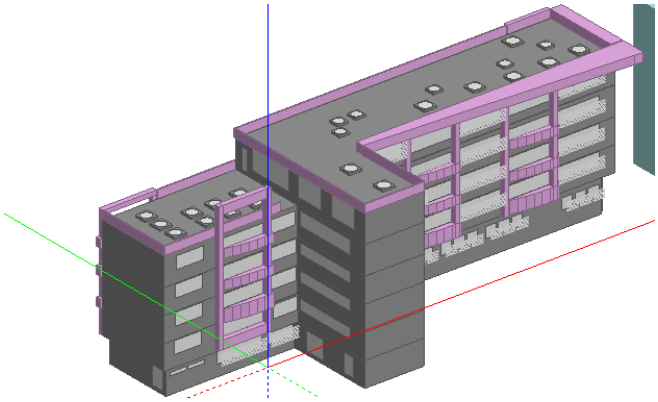
Inicialmente, fue necesario importar planos *As – Built* en vista de planta[17] como guía para el trazado del perímetro de los bloques que representan las diferentes plantas de

[17] Representación gráfica bidimensional de un proyecto, ubicación y dimensiones, o partes del mismo sobre un plano horizontal visto desde arriba

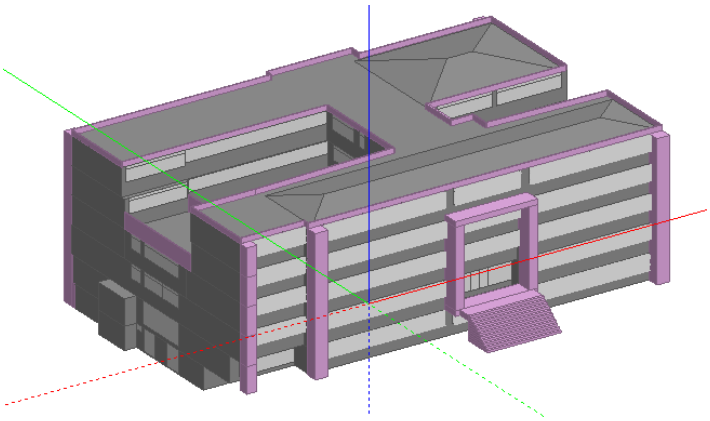
la edificación. A partir de éstos, se realizó el trazado de particiones interiores, con el fin de generar los diferentes espacios que componen las edificaciones. Posteriormente, usando algunas herramientas de dibujo del DesignBuilder se definieron las aberturas de los modelos: ventanas, puertas y huecos. Finalmente, se realizó la definición de los elementos arquitectónicos de la fachada y elementos generadores de sombra.

En el caso del Edificio E3T, fue necesario realizar una aproximación al modelado de los tubos solares ya que DesignBuilder no incluye esta estrategia de ahorro energético. La Figura 9 presenta los tres modelos geométricos que representan las edificaciones seleccionadas.

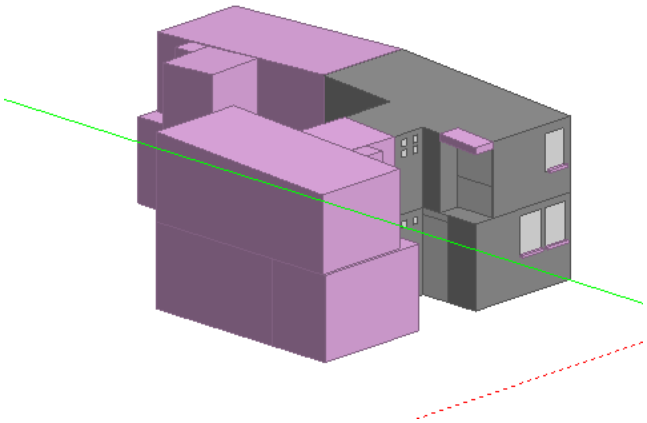
Figura 9. Modelos geométricos en DesignBuilder que representan las edificaciones objeto de estudio.



a) Edificio de Ingeniería Eléctrica



b) Edificio de Ingeniería Industrial



c) Vivienda de interés social.

3.2.2. Asignación de datos a los modelos geométricos

Posterior al modelado geométrico, se realizó la asignación de los datos del modelo. En DesignBuilder este proceso se realiza a través de cinco pestañas localizadas en la interfaz principal del software: Actividad, Cerramientos, Aberturas, Iluminación y Sistemas HVAC.

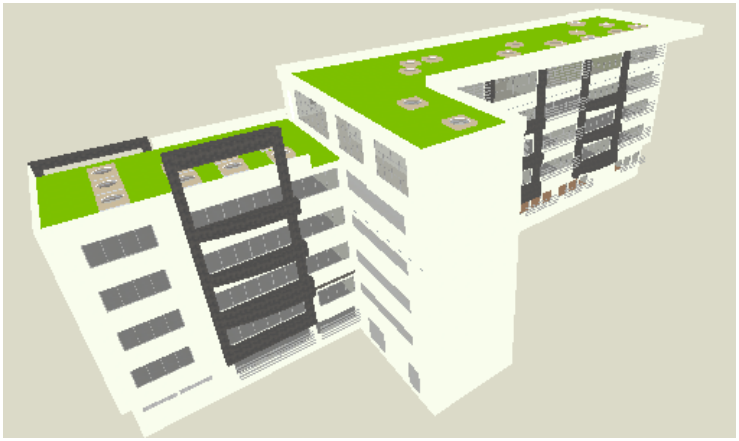
En *Actividad* se ingresaron datos relacionados con el uso y ocupación de las edificaciones tales como características de los ocupantes, temperatura de funcionamiento del sistema de refrigeración, ganancias térmicas asociadas a equipos de cómputo, ofimáticos, misceláneos, cocina y procesos entre otros. Estos datos fueron asignados a cada uno de los espacios de las edificaciones seleccionadas, con el fin de mejorar la fiabilidad en los modelos energéticos. En *Cerramiento*s se permite la definición de datos característicos tales como muros exteriores, particiones interiores, cubiertas planas, cubiertas inclinadas, pisos sobre el terreno y placas entrepiso; inclusive posibilita la inclusión de cubiertas verdes, como se realizó en el caso del Edificio E3T. Este suministro de información se basa en datos obtenidos de planos *As – Built* y de visitas de inspección a las edificaciones.

En *Aberturas* fueron definidos datos relacionados con el tipo de vidrio, marcos y divisores de las ventanas. De igual manera se especificó el porcentaje de apertura de las ventanas para las edificaciones y espacios con ventilación natural. Los datos de *Iluminación* que son solicitados por DesignBuilder están relacionados con el tipo de lámparas y la ubicación de las luminarias, densidad de potencia de iluminación

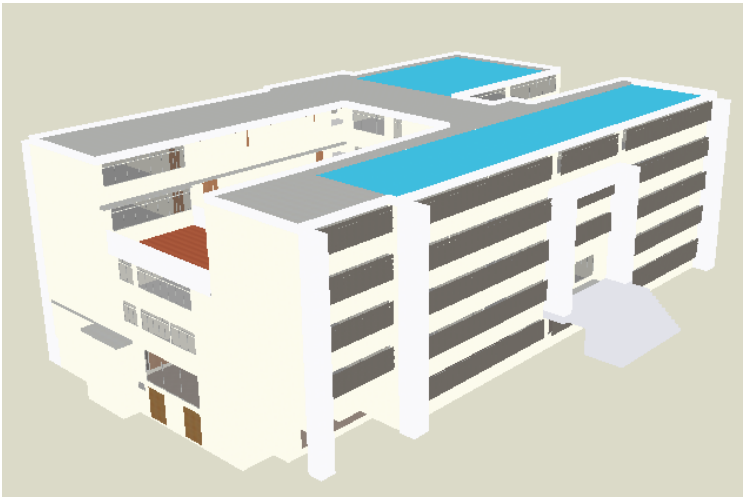
artificial, y si es el caso, el tipo de control del sistema de iluminación. Finalmente, en *Datos de HVAC* fueron introducidas algunas características de los sistemas de climatización artificial de las diferentes edificaciones tales como tipo, capacidad y COP, entre otras. De igual forma se definieron los espacios que utilizan la ventilación natural como alternativa de climatización. El Anexo E muestra los datos introducidos en los modelos geométricos que representan las edificaciones seleccionadas.

Posterior al proceso de asignación de datos es posible apreciar el modelo virtual finalizado usando la opción de *Visualizar* de DesignBuilder. La Figura 10 muestra los modelos virtuales de las edificaciones seleccionadas.

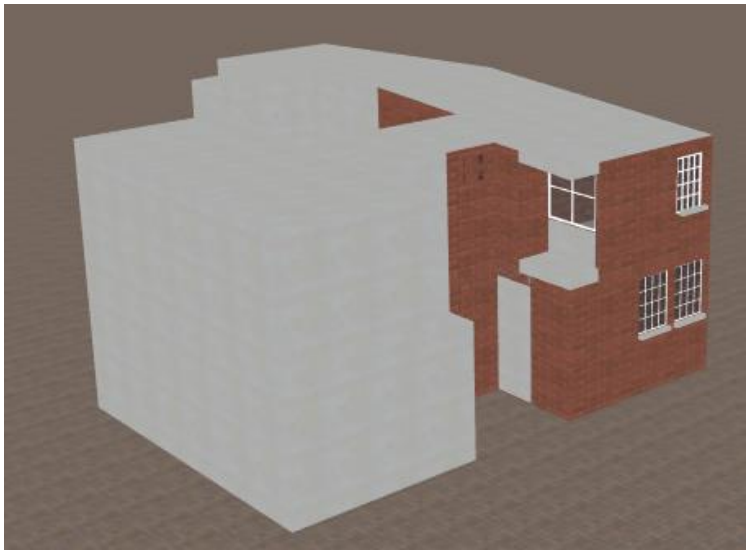
Figura 10. Modelos energéticos renderizados de las edificaciones objeto de estudio.



a) Edificio de Ingeniería Eléctrica



b) Edificio de Ingeniería Industrial



c) Vivienda de Interés Social.

Este capítulo permitió recopilar el procedimiento para la obtención de modelos virtuales de edificaciones en DesignBuilder. Éste se compone de dos fases: modelado geométrico y asignación de datos del modelo. La fase de modelado geométrico permite obtener una representación 3D de la edificación a evaluar a través de un modelado por bloques. En la fase de asignación de datos se configura el modelo geométrico del edificio con la información de sus características constructivas, sistemas y regímenes de ocupación y operación.

La calidad de este proceso incide en forma directa sobre la exactitud de los resultados de las simulaciones, por lo que las simplificaciones en el modelado geométrico y la asignación de datos realizadas por el usuario de la HSE deben estar soportadas en su propia experticia o en recomendaciones de tutoriales u otros usuarios.

4. AJUSTE DE LOS MODELOS VIRTUALES

Este capítulo presenta el proceso de ajuste de los modelos virtuales de las edificaciones objeto de estudio. En primer lugar, se presenta una revisión bibliográfica de aspectos relacionados con el ajuste de modelos virtuales; posteriormente, se plantea y desarrolla la metodología para el ajuste de los modelos.

4.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL AJUSTE DE MODELOS VIRTUALES DE EDIFICACIONES

Por lo general, el modelado virtual de edificaciones es una tarea compleja debido a las diversas suposiciones que el usuario de la herramienta debe realizar sobre aspectos relacionados con la caracterización del edificio [64]. Dichas suposiciones tienen un impacto directo en la exactitud y la veracidad de los resultados de las simulaciones [65]. En tal sentido, se requiere del ajuste de los parámetros de entrada de las herramientas de simulación mediante datos del edificio. A este proceso se le conoce en la literatura como calibración de modelos virtuales [66], por tal motivo, en adelante se hará uso de éste término en referencia al ajuste de modelos virtuales.

4.1.1. Generalidades de la calibración de modelos virtuales

La calibración de modelos virtuales puede ser realizada según la manera como se ajustan los parámetros de entrada en el modelo virtual de la edificación, a saber: i) calibración manual, iterativa y pragmática; ii) calibración por comparación gráfica de información y iii) calibración analítica o calibración por métodos matemáticos. Estos tipos de calibración pueden ser agrupados en dos enfoques: calibración manual y calibración automatizada. La primera se caracteriza por la intervención pragmática del modelador energético y la segunda por tener algún tipo de proceso no conducido por el mismo que requiere del uso de ordenadores para un procesamiento intensivo de datos [64].

Actualmente, la mayoría de las calibraciones de modelos virtuales se realizan de forma manual [64], a partir del ajuste manual de los parámetros de entrada. Para verificar el grado de ajuste de dichos parámetros se realiza la comparación entre resultados de las simulaciones energéticas y valores medidos. Según la literatura, es común usar

datos del consumo energético del edificio obtenidos de facturas del servicio eléctrico o a través de procesos de monitorización desarrollados en intervalos largos (mayores a un mes o anuales) o cortos (menores a un mes) [64], [66], [67]. De igual forma, suelen ser utilizados datos de variables ambientales como humedad relativa y temperatura del aire interior [68].

El proceso de calibración puede ser desarrollado a través de diferentes niveles, según la información que se tenga disponible para el ajuste de las entradas y la comparación de las salidas. La Tabla 20 muestra la recopilación de niveles de calibración con aumento progresivo de datos realizada por Fabrizio *et al*. [65].

Tabla 20. Niveles de calibración de modelos virtuales según información disponible de una edificación. Traducción libre de [65].

Nivel de calibración	**Datos disponibles del edificio**					
	Facturas eléctricas	Datos As-Built	Visita al edificio o inspección	Auditoria detallada	Monitorización de corto plazo	Monitorización de largo plazo
Nivel 1	X	X				
Nivel 2	X	X	X			
Nivel 3	X	X	X	X		
Nivel 4	X	X	X	X	X	
Nivel 5	X	X	X	X	X	X

En relación a las etapas del proceso de calibración, la ASHRAE Guideline 14[18] recomienda tener en cuenta las siguientes: producción del plan de simulaciones de calibración, recolección de datos, introducción de datos dentro del software de simulación, comparación de las salidas de los modelos con los datos medidos y refinamiento del modelo hasta que se logre una calibración aceptable [69]. En el caso de edificaciones emplazadas en el trópico, Pedrini *et al.* [70] resume las etapas de la ASHRAE Guideline 14 y recomienda una metodología de calibración compuesta por tres pasos: recolección de información preliminar del edificio, visitas de inspección y mediciones puntuales a los sistemas de la edificación (nivel de iluminación, flujos de aire, potencia activa de iluminación entre otros).

[18] Este documento proporciona directrices para la medición de energía, demanda y ahorros de agua logrados en proyectos de conservación ambiental y energética. Incluye una sección dedicada a recomendaciones para la calibración de modelos virtuales de edificaciones.

Para realizar el ajuste de los modelos virtuales de las edificaciones objeto de estudio se consideró una metodología compuesta por dos fases o niveles según la información preliminar del edificio (información *As-Built*) e información recopilada mediante visitas de inspección. Un mayor detalle de la metodología de calibración se presenta en la siguiente sección.

4.1.2. Criterios para evaluar la calibración

Para obtener una medida del ajuste del modelo virtual se emplean usualmente índices de tipo estadístico tales como el error cuadrático medio (RMSE), el coeficiente de variación del error cuadrático medio (CV-RMSE) y el error sesgado medio (MBE) [64], [66], [69]. La Tabla 21 presenta la ecuación característica de cada índice y las convenciones asociadas.

Tabla 21. Índices estadísticos para evaluar la calibración de modelos virtuales de edificios.

Índice	Ecuación	Convenciones de la ecuación
Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE)[19]	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{Np}(m_i - s_i)^2}{Np}}$	m_i y s_i son los valores medidos y simulados para cada instancia i del modelo. Np es el número de valores en un intervalo p ($Nmensual = 12$, $Nhorario = 8760$).
Coeficiente de Variación del Error Cuadrático Medio (CV-RMSE)[20]	$CV - RMSE = \frac{RMSE}{\mu} \times 100\ \%$	μ es el valor medio de los valores medidos.
Error Sesgado Medio (MBE)[21]	$MBE = \frac{\sum_{i=1}^{Np}(m_i - s_i)}{\sum_{i=1}^{Np}(m_i)} \times 100\ \%$	m_i y s_i son los valores medidos y simulados para cada instancia i del modelo. Np es el número de valores en un intervalo p ($Nmensual = 12$, $Nhorario = 8760$).

[19] RMSE: *Root mean square error.*
[20] CV-RMSE: *Coefficient of Variation of the root mean squared error.*
[21] MBE: *Mean bias* error.

4.1.3. Valores de aceptación para la calibración

De acuerdo con la revisión bibliográfica, existen tres documentos representativos que incluyen recomendaciones y criterios para la validación de calibraciones de modelos virtuales: Protocolo Internacional de Medición y Verificación del Desempeño (IPMVP), Programa General de Medición de Energía (FEMP) y *ASHRAE Guideline 14*; siendo este último el de mayor aplicación [17], [64], [71], [72]. A pesar de lo anterior, no existe un estándar aceptado debido a que ninguno de estos documentos de referencia proporciona una metodología para llevar a cabo una calibración [66]. Sin embargo, si incluyen valores de aceptación para indicadores estadísticos tales como el coeficiente de variación del error cuadrático medio (CV-RMSE) y el error sesgado medio (MBE). La Tabla 22 muestra los valores límite de los mencionados indicadores estadísticos.

Tabla 22. Valores de aceptación para los indicadores estadísticos de evaluación de la calibración. Adaptada de [64].

Estándar	Criterio mensual (%)		Criterio horario (%)	
	MBE	CVRMSE	MBE	CVRMSE
ASHRAE 14	5	15	10	30
IPMVP	20	-	5	20
FEMP	5	15	10	30

Es importante denotar que estos límites de aceptación son aplicables a procesos de calibración donde se usan valores medidos del consumo energético que han sido obtenidos en forma horaria o mensual para un periodo de un año. Sin embargo, cuando no se dispone de estos datos, es común que se tenga como insumo valores medidos en un instante de tiempo específico o en cortos periodos de tiempo, por lo general con instrumentos de tipo manual. En estos casos, el análisis de indicadores estadísticos es aplicado a esta monitorización de corto plazo [64].

En este sentido, la ASHRAE 14 expresa que el intervalo de tiempo aceptado de la calibración depende de factores como la disponibilidad de datos medidos, la exactitud deseada y las características del edificio, por lo cual, no proscribe las mediciones de corto plazo, en lugar de eso recomienda que la determinación del intervalo de medida se haga bajo el criterio del modelador energético [69].

4.2. METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN

A continuación se describe la metodología de calibración propuesta para la validación de los modelos virtuales de las edificaciones seleccionadas.

4.2.1. Descripción de la metodología de calibración

La metodología seguida para la calibración de los modelos virtuales fue establecida teniendo en cuenta el ajuste manual de los parámetros de entrada y la disponibilidad de datos medidos. Además se encuentra soportada en dos niveles de calibración aplicables según el avance del proceso de calibración de acuerdo con adaptación de [73] y recomendaciones de la ASHRAE 14.

Primer nivel de calibración

Corresponde a los modelos virtuales construidos con información *As-Built*, datos de ocupación y uso recientes, así como archivo de datos climáticos actualizado. La verificación del grado de ajuste se realizó a través de la comparación del valor medido y simulado del consumo energético anual ya que no se disponía de valores mensuales y horarios. Las principales entradas de los modelos virtuales en este nivel son:

- Características arquitectónicas y constructivas de las edificaciones obtenidas mediante documentación de especificaciones de obra y planos “As-Built”.
- Datos recientes del número máximo de ocupantes y horarios típicos de ocupación.
- Inventario y potencias nominales de los componentes de los sistemas de iluminación y climatización artificial obtenidos de manuales de operación, documentación de especificaciones de obra y visitas de inspección.
- Inventario y potencias nominales de equipos eléctricos obtenidos mediante trabajos grado de pregrado.
- Archivo climático actualizado con datos anuales recientes tomados en una estación meteorológica localizada en el campus principal de la Universidad Industrial de Santander.

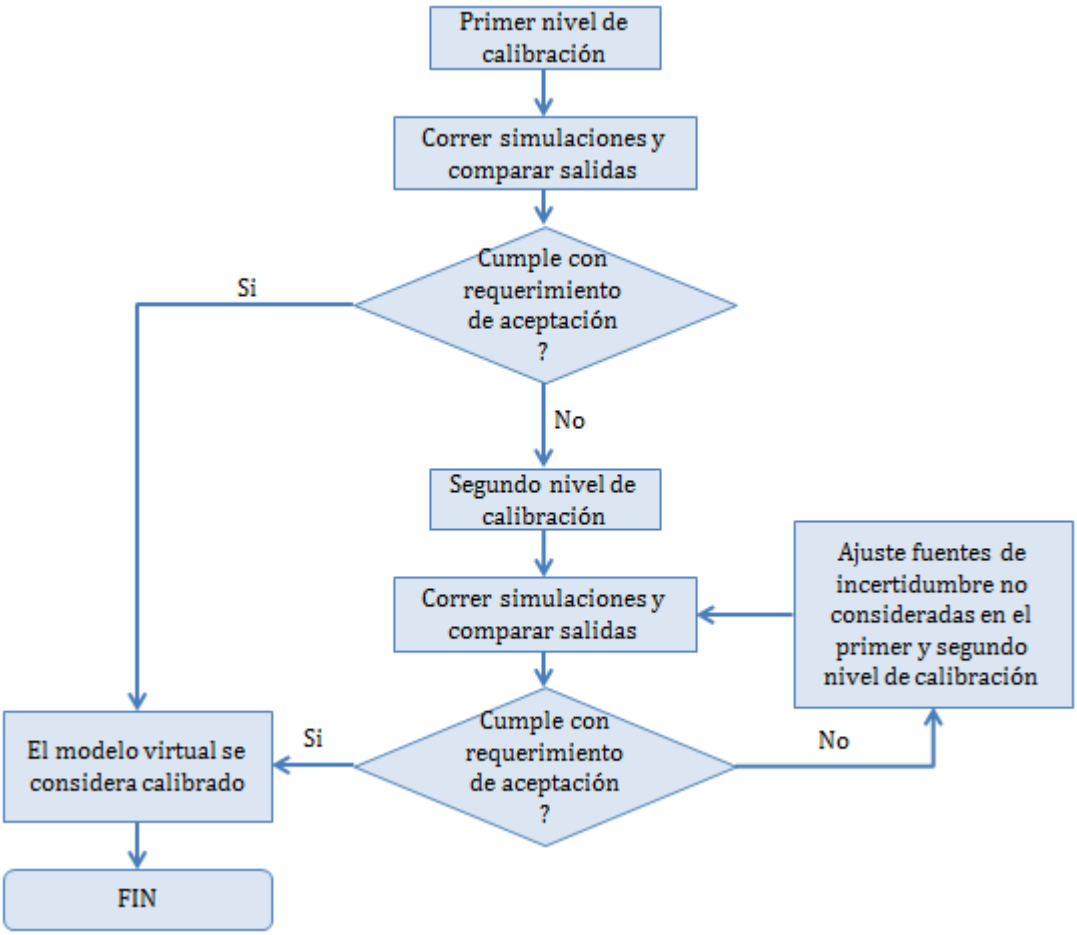
Segundo nivel de calibración

Si el grado de ajuste de los modelos virtuales en el primer nivel de calibración no satisface el requerimiento de aceptación planteado, se procede a refinar los modelos virtuales con datos recopilados *in situ* de características arquitectónicas, materiales

constructivos, inventario de equipos eléctricos y regímenes de ocupación. Nuevamente la verificación del grado de ajuste de realiza a través de la comparación del valor medido y simulado del consumo energético anual.

Si aún no se satisface el requerimiento de aceptación planteado, se procede a intervenir otras fuentes de incertidumbre relacionas con datos específicos de los sistemas del edificio (eficiencia de sus componentes), tasas de infiltración de aire exterior, entre otras. Para esto podrán emplearse mediciones puntuales, pruebas especiales y monitorización de largo plazo. La Figura 11 muestra en resumen la metodología de calibración llevada a cabo.

Figura 11. Diagrama de flujo de la metodología seguida para la calibración de los modelos energético de las edificaciones seleccionadas.



4.2.2. Desarrollo de la metodología de calibración

Se realizaron un total de seis (6) simulaciones para la calibración de los modelos virtuales, dos por cada modelo (una para cada nivel de calibración). Tras configurar el modelo con las entradas del primer nivel de calibración se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 23.

Tabla 23. Diferencia porcentual entre valores medidos y simulados del consumo anual energético de los modelos virtuales en primer nivel de calibración.

Modelo virtual	Consumo energético anual simulado [kWh/año]	Consumo energético anual medido [kWh/año]	Diferencia porcentual [%]
Edificio de Ingeniería Eléctrica	62 603,4	48 200,5	29,9
Edificio de Ingeniería Industrial	301 677,1	242 780,1	24,3
Vivienda de Interés social	2 297,4	1 751,8	31,1

Debido a la ausencia de valores de aceptación anuales para la evaluación del grado de ajuste de los modelos virtuales, se planteó como requerimiento de aceptación una diferencia porcentual anual máxima del 3% entre los valores medidos y simulados del consumo energético. En la determinación de este porcentaje se tuvo en cuenta la magnitud de los resultados requeridos en los análisis de establecimiento del desempeño energético de los modelos virtuales.

Teniendo en cuenta lo anterior, ninguno de los modelos virtuales simulados en el primer nivel de calibración cumple con el requerimiento de aceptación. Por tal motivo, fue necesario ajustar las entradas asociadas al segundo nivel de calibración.

Para el modelo virtual del Edificio de Ingeniería Eléctrica se ajustaron horarios de ocupación, cantidad de personas y ganancias térmicas de computadores en espacios como el CIEE, la sala de estudio grupal y la sala de estudio individual. De igual manera, se realizó un ajuste del número de equipos ofimáticos presentes en las zonas del área administrativa del edificio. Otro de los ajustes realizados fue la corrección de la ubicación de algunas ventanas exteriores que no corresponden con la realidad.

En el caso del modelo virtual del Edificio de Ingeniería Industrial se realizaron ajustes en los perfiles de ocupación de las oficinas de los profesores y de las aulas de clase, así como en la cantidad de computadores del centro de estudios y el área de investigación. También se refino el funcionamiento de los aires acondicionados del quinto piso.

Para la VIS se ajustó el horario de funcionamiento de la iluminación, la cantidad y potencia de los electrodomésticos en cada una de las zonas. La Tabla 24 presenta los resultados del nivel de calibración II.

Tabla 24. Diferencia porcentual entre valores medidos y simulados del consumo anual energético de los modelos virtuales en el Nivel II de calibración.

Modelo virtual	Consumo energético anual simulado [kWh/año]	Consumo energético anual medido [kWh/año]	Diferencia porcentual [%]
Edificio de Ingeniería Eléctrica	49 228,3	48 200,5	2,13
Edificio de Ingeniería Industrial	247 234,1	242 780,1	1,83
Vivienda de Interés social	1 770,5	1 751,8	1,06

Según los resultados del segundo nivel de calibración, los modelos virtuales de las edificaciones seleccionadas presentan diferencias porcentuales menores a la diferencia porcentual máxima tolerable, por lo que son considerados aptos para ser usados en los análisis energéticos.

Como resultado de este capítulo se logró establecer un procedimiento para el ajuste de los modelos virtuales de edificaciones. Dicho proceso fue construido a partir de las recomendaciones de Fabrizio *et al* [65] y está compuesto por dos fases o niveles de calibración. El primer nivel de calibración corresponde con los datos de entrada de tipo *"As-Built"* disponible en los documentos de construcción de la edificación. El segundo nivel de calibración está asociado a datos de entrada corregidos por visitas de inspección.

La verificación del grado de ajuste de los modelos virtuales se realizó a través de la cuantificación del error existente entre el valor medido y simulado del consumo energético anual, ya que no se disponía de valores mensuales (recomendados en la herramienta metodológica propuesta en el capítulo 6). A dicho error le fue asignado un valor del 3% teniendo en cuenta el orden de los resultados de simulación que serán usados para el análisis y establecimiento del desempeño energético.

5. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO ENERGÉTICO

Este capítulo presenta la evaluación del desempeño energético de las tres edificaciones modeladas anteriormente en DesignBuilder. Inicialmente, se muestra una revisión bibliográfica de aspectos relacionados con la evaluación del desempeño energético de edificaciones; posteriormente, se plantea y desarrolla una metodología para la evaluación comparativa del desempeño energético de las edificaciones objeto de estudio.

5.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DE LA EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO ENERGÉTICO DE EDIFICACIONES

La revisión bibliográfica presentada a continuación tiene como fin la identificación de métodos, indicadores, valores de referencia y resultados de simulación útiles en el establecimiento del desempeño energético de una edificación.

5.1.1. Desempeño energético de edificaciones

La evaluación del desempeño energético de una edificación se realiza por dos propósitos: clasificar el edificio en su desempeño y realizar un diagnóstico del comportamiento energético [49]. La cuantificación de la energía asociada a una edificación es la base para la evaluación del desempeño energético. Para dicha cuantificación pueden emplearse tres tipos de métodos: métodos basados en cálculos, métodos basados en mediciones y métodos híbridos (emplean cálculos y mediciones).

Los métodos basados en cálculos como simulaciones dinámicas y métodos de estado estable son usados mayormente en la evaluación del desempeño energético de edificaciones en proceso de diseño, ya que no existen datos disponibles del desempeño operacional de la edificación [74]. Por el contrario, los métodos basados en medidas como la monitorización de edificaciones y el análisis de consumos energéticos medidos por la empresa proveedora del servicio eléctrico son usados comúnmente para edificaciones construidas [49]. Sin embargo, a medida que aumenta la complejidad de la edificación, suelen usarse métodos híbridos como la simulación calibrada y el modelado dinámico inverso [49], [74], [75].

En el caso de emplear la simulación calibrada en el proceso de evaluación del desempeño energético de edificaciones construidas, se requiere de la recolección de información detallada del edificio relaciona con su envolvente, sus sistemas y condiciones de operación [74].

5.1.2. Clasificación del desempeño energético

La clasificación del desempeño energético de una edificación permite determinar la calidad de un edificio en términos del uso de la energía en comparación con los demás [49]. Existen diferentes maneras para clasificar el desempeño energético de una edificación: etiquetado energético, certificación energética y evaluación comparativa *(Benchmarking).*

La clasificación del desempeño energético por etiquetado energético consiste en la asignación de una clase o etiqueta de desempeño energético a una edificación. Este método requiere del desarrollo de una escala relacionada a un índice de etiquetado energético, dicha escala determina las bandas para las clases de acuerdo con el ahorro energético que presenta el edificio [74].

En el caso de la certificación energética, la clasificación del desempeño energético se realiza a través de un certificado otorgado por una institución o persona autorizada [74]. Existen diferentes métodos para la certificación de un edificio: métodos basados en la evaluación de criterios (LEED, BREEAM), métodos basados en la cuantificación de la reducción de los impactos energéticos y ambientales (EDGE, VERDE), y métodos basados en el cálculo de parámetros de eco eficiencia (CASBEE) [76].

La clasificación por evaluación comparativa consiste en la comparación del desempeño energético de una edificación, generalmente mediante indicadores, contra un grupo de edificaciones [49], [74]. Para aplicar la evaluación comparativa debe considerarse la existencia de una base de datos con información sobre el desempeño energético de un número significativo de edificaciones [16]. Las simulaciones energéticas pueden emplearse para generar una base de datos de comparación, aunque es poco práctico teniendo en cuenta el tiempo requerido para el modelado energético de cada edificación.

La clasificación del desempeño energético por evaluación comparativa puede ser realizada de dos maneras: evaluación comparativa de todo el edificio y evaluación comparativa jerárquica [74]. La evaluación comparativa de todo el edificio es un método simple y efectivo para evaluar todo el desempeño energético del edificio comparando un indicador de desempeño energético con la referencia. La evaluación comparativa jerárquica se refiere a la evaluación del rendimiento energético del edificio por niveles, sistemas o componentes. Este método es más efectivo para el diagnóstico de áreas problemáticas y la generación de recomendaciones [77]. En este caso el desempeño energético de las edificaciones es evaluado teniendo en cuenta índices de diferentes tipos de usos finales de la energía [74].

Cuando no se cuenta con un grupo de edificaciones contra el cual comparar, se recomienda comparar los indicadores del desempeño energético del edificio frente a los de su edificio de referencia, el cual es generado a partir de un conjunto de reglas estándar [16], [49], [74]. Este tipo de clasificación del desempeño energético de edificaciones ha sido ampliamente utilizada en esquemas de certificación ambiental y energética de varios países [49].

5.1.3. Indicadores para la evaluación comparativa del desempeño energético

Para la evaluación comparativa del desempeño energético de edificaciones se requiere la estimación de indicadores [74]. El indicador más usado para este fin se define como el cociente entre el consumo energético y el área del edificio, por lo cual está expresado en kW/m^2 [75], [78]. Otros indicadores tienen en cuenta los diferentes usos de la energía y las condiciones de confort al interior de las edificaciones, en tal sentido, se encuentran indicadores como la energía anual de refrigeración, energía anual de iluminación y horas anuales de disconfort térmico [78].

Varias investigaciones proponen nuevos indicadores para la evaluación comparativa del desempeño energético de edificaciones. En [79] se propone el índice energético climático y el índice energético del edificio para cuantificar el impacto del clima sobre el desempeño energético, mientras que en [80] se proponen indicadores para evaluar el desempeño energético de la envolvente de la edificación teniendo en cuenta el factor solar de muros exteriores y aberturas. La Tabla 25 presenta un resumen de los

indicadores encontrados para la evaluación de aspectos de las edificaciones tales como el desempeño energético, el confort térmico y las emisiones contaminantes.

Tabla 25. Indicadores para la evaluación de aspectos energéticos y ambientales de las edificaciones.

Aspecto evaluado	Indicadores	Referencias
Desempeño energético	Consumo energético anual total [kW/m^2].	[44], [81], [82].
	Consumo energético anual en refrigeración [kW/m^2].	[78], [81].
	Consumo energético anual en iluminación [kW/m^2].	[78], [81].
	Ahorro energético por generación en sitio [kW/m^2].	[82]
	Ahorro energético por estrategias de alta eficiencia energética [kW/m^2].	
	Nivel de sostenibilidad energética	
Confort térmico	Horas anuales de disconfort térmico [Horas/año]	[40], [78]
	Índices de confort térmico	[40], [44]
	Temperatura del aire [°C]	[44].
	Humedad relativa [%]	
	Velocidad del aire [m/s]	
Emisiones contaminantes	Emisiones anuales CO_2 [kg_{eq} CO_2/m^2]	[40], [81]

5.1.4. Valores límite para la evaluación comparativa del desempeño energético

Generalmente se configura un valor mínimo para los indicadores de desempeño energético, que puede ser de dos tipos: limites fijos y limites personalizados [16]. Los límites fijos están relacionados con estándares y regulaciones energéticas. Mientras los valores limites personalizados pueden obtenerse por auto – referencia. Los valores limites fijos y personalizados presentados a continuación corresponden con aquellos que aplican o pueden ser aplicados en la evaluación comparativa del desempeño energético de edificaciones emplazadas bajo condiciones tropicales similares a aquellas presentes en Bucaramanga.

Valores límite fijos

Recientemente, el Ministerio de Vivienda, Cuidad y Territorio de Colombia expidió la Resolución 0549 de 2015, la cual establece los porcentajes mínimos de ahorro de energía y agua en edificaciones que serán de obligatorio cumplimiento para todo el país a partir de julio de 2017. Dicho documento plantea en su Anexo 1 (Guía de construcción sostenible para el ahorro de agua y energía en edificaciones) la línea

base del consumo energético promedio según zona climática y tipo de edificación. En la elaboración de esta línea base fueron considerados los sistemas constructivos más comúnmente utilizados y los perfiles de uso (horarios, ocupación, sistema de iluminación, sistema de aire acondicionado, etc.) característicos según el tipo de edificación. La línea base fue validada por las oficinas regionales de Camacol y consultores activos [83]. La Tabla 26 presenta la línea base de consumo energético para distintos tipos de edificaciones en diferentes tipos de clima.

Tabla 26. Línea base consumo energético Resolución 0549 de 2015.Tomado de [83].

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

Valores límite personalizados

Actualmente, en Colombia no existe un estándar que proporcione indicaciones sobre cómo obtener valores límites personalizados que sirvan para la evaluación comparativa del desempeño energético de una edificación. Sin embargo, es común encontrar la aplicación de estándares internacionales para este fin. Tal es el caso del método de evaluación del desempeño energético propuesto en el Apéndice G del estándar ASHRAE 90.1, el cual está basado en la comparación de los consumos energéticos de dos modelos de simulación energética: edificio evaluado y edificio base, con el objetivo de calcular el porcentaje de ahorro energético (porcentaje de mejora) del edificio evaluado con respecto al edificio base. El *Edificio base* corresponde a una variación de la edificación evaluada que cumple todos los requerimiento del estándar ASHRAE 90.1 [84].

Este método de auto – referencia también es usado por el estándar de certificación energética LEED para la evaluación del porcentaje de mejora relacionado al costo energético. Lo anterior permite otorgar créditos a la edificación evaluada por efecto del cumplimiento de los requisitos energéticos de dicho estándar [85].

La aplicación del método de evaluación del desempeño energético del Apéndice G de la ASHRAE 90.1 debe realizarse teniendo en cuenta que ambas simulaciones (edificio evaluado y edificio base) utilicen la misma herramienta de simulación energética, los mismos datos climáticos, la misma tarifa energética, y el mismo régimen de operación. Asimismo, debe tenerse en cuenta que este método de evaluación del desempeño energético es aplicable a todo tipo de edificaciones excepto aquellas sin sistemas HVAC mecánicos y sin envolvente [85]. La Tabla 27 muestra las principales diferencias entre el modelo energético del edificio evaluado y el modelo energético del edificio base.

Tabla 27. Diferencias entre los modelos energéticos del edificio evaluado y el edificio base. Adaptado de [86].

Tópico	Edificio evaluado	Edificio base o de referencia
Archivo climático	Los datos climáticos horarios deben representar el clima donde se emplaza el edificio.	
Geometría	Igual que en el diseño	Igual que en el diseño excepto: - Área de acristalamiento: Máximo 40% de la relación ventana – pared de cada fachada. - Área de tragaluces: máximo el 5% de la relación tragaluz – techo. - Orientación: Cuatro modelos de edificios base con variaciones en la orientación del edificio de 90° (edificio en diseño).
Sombreado solar	- Las protecciones solares exteriores y las obstrucciones del sitio son modeladas. - Los dispositivos de sombreado de ventanas de tipo manual como persianas o cortinas no serán modelados, pero pueden modelarse los dispositivos de sombreado de control automático.	- No se considera ningún dispositivo de sombreado ni obstrucciones propias del sitio.
Requerimientos de zonificación	Ambos modelos deben seguir ciertas reglas de zonificación térmica, dependiendo de si las zonas con HVAC están diseñadas o no.	
Materiales y elementos constructivos	- Iguales al diseño, pero si los materiales y elementos constructivos no están listados en el apéndice a de la ASHRAE 90.1 se requiere informar a la autoridad de rateo.	- Los elementos constructivos tienen que ajustarse a los valores U en base al tipo de edificio, tipo de espacio, acristalamientos y zona climática. - No considera los techos frescos (techos o cubiertas que impiden el

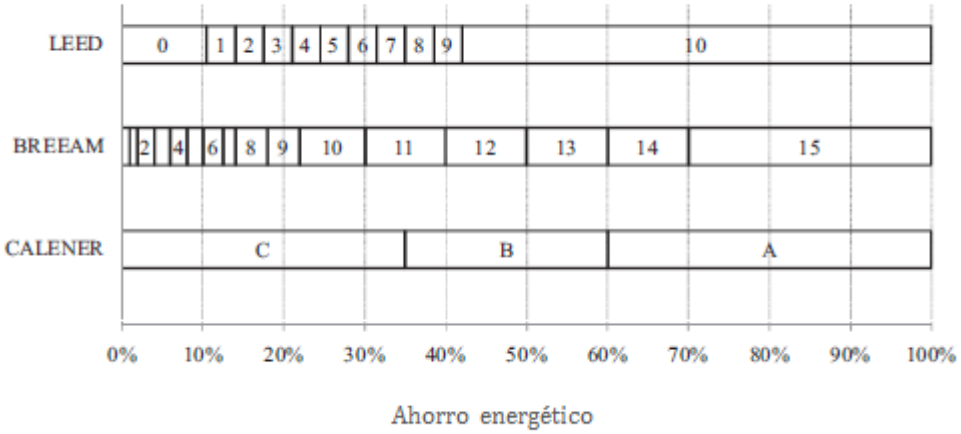
	- Identificación de techos frescos.	paso de la mayor parte de radiación solar).
Datos del espacio	- La potencia de iluminación se determina en base al sistema de iluminación existente, diseñado o especificado.	- La potencia de iluminación se determina usando el mismo procedimiento de categorización y categorías como el edificio en evaluación con potencia de iluminación configurada igual al máximo permitido por el método y categoría correspondiente en la ASHRAE 90.1 sección 9.2.
	- Los equipos misceláneos y las ganancias de ocupación deben ser estimadas en base al tipo de edificio o el tipo de espacio, son idénticos en el edificio base y el edificio a evaluar. - Los programas de ocupación, potencias de iluminación, electricidad de equipos y la operación de los sistemas de climatización son iguales en el edificio base y el edificio propuesto. - Los puntos de ajuste del control de la temperatura y la humedad deben ser los mismos para el edificio a evaluar y el edificio base.	
Sistemas HVAC	- El sistema HVAC es determinado por el sistema existente, diseñado o especificado.	- Se debe usar un tipo específico de sistema HVAC basado en el tipo de edificio, tipo de combustible, área y altura de la edificación.
Sistema de agua caliente	- Igual que el sistema actual cuando existe el servicio de agua caliente. - Igual que el diseño cuando el sistema está especificado. - Adaptación del sistema utilizado en el modelo de referencia cuando el sistema no ha sido especificado.	- Igual que el sistema actual cuando existe un servicio de agua caliente. - Este debe coincidir con la eficiencia mínima cuando se especifican los requisitos del sistema. - Este deberá usar el sistema de resistencia eléctrica y combinar los mínimos requisitos de eficiencia cuando el sistema no se ha especificado.
Infiltración y ventilación	La tasa de infiltración es la misma que en el diseño y la mínima tasa de ventilación exterior es la misma en ambos casos.	
Energías renovables	Si	No

5.1.5. Escalas de valoración del desempeño energético de edificaciones

Actualmente, en Colombia no existe una escala de valoración para el desempeño energético de edificaciones. Sin embargo, pueden encontrarse en la literatura diferentes escalas de etiquetado que basan sus rangos en términos del porcentaje de ahorro que presenta la edificación con respecto a un edificio de referencia [16], [49]. La

Figura 12 presenta una comparación entre diferentes escalas de valoración del rendimiento energético de edificios.

Figura 12. Escalas de valoración del rendimiento energético de edificaciones. Tomado de [49].



5.2. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO ENERGÉTICO DE LAS EDIFICACIONES OBJETO DE ESTUDIO.

A partir de la información recopilada en la revisión bibliográfica, se plantea evaluar y establecer el desempeño energético de las edificaciones objeto de estudio a través de un proceso que comprende al análisis energético general de la edificación y la evaluación comparativa de indicadores. Las fases de dicho proceso son descritas a continuación.

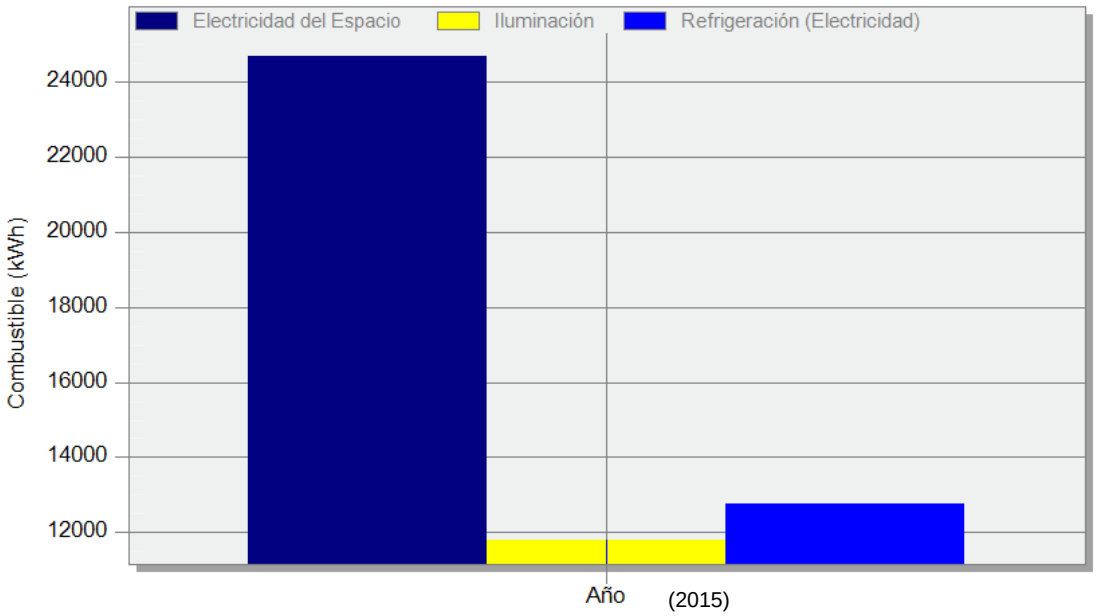
5.2.1. Fase 1: Análisis general del comportamiento energético

Esta fase analiza los resultados de las simulaciones energéticas relacionados con aspectos como el consumo energético, confort térmico, ganancias térmicas interiores, balance térmico de cerramientos y emisiones contaminantes. Esto con el objetivo de identificar los factores influyentes en el desempeño energético de la edificación. A continuación se presenta los resultados de simulación más relevantes relacionados con el comportamiento energético de los edificios de Ingeniería Eléctrica, Ingeniería Industrial y la vivienda de interés social.

- **Análisis comportamiento energético Edificio de Ingeniería Eléctrica**

Según los resultados de las simulaciones energéticas, el Edificio de Ingeniería Eléctrica tiene un consumo energético anual de 49 228,3 kWh, el cual se distribuye en consumo energético de equipos instalados y otros equipos que se pueden conectar 50%, consumo energético de iluminación 24%, y consumo energético de refrigeración 26%. La Figura 13 presenta el desglose del consumo energético anual del edificio.

Figura 13. Desglose del consumo energético anual del Edificio de Ingeniería Eléctrica.



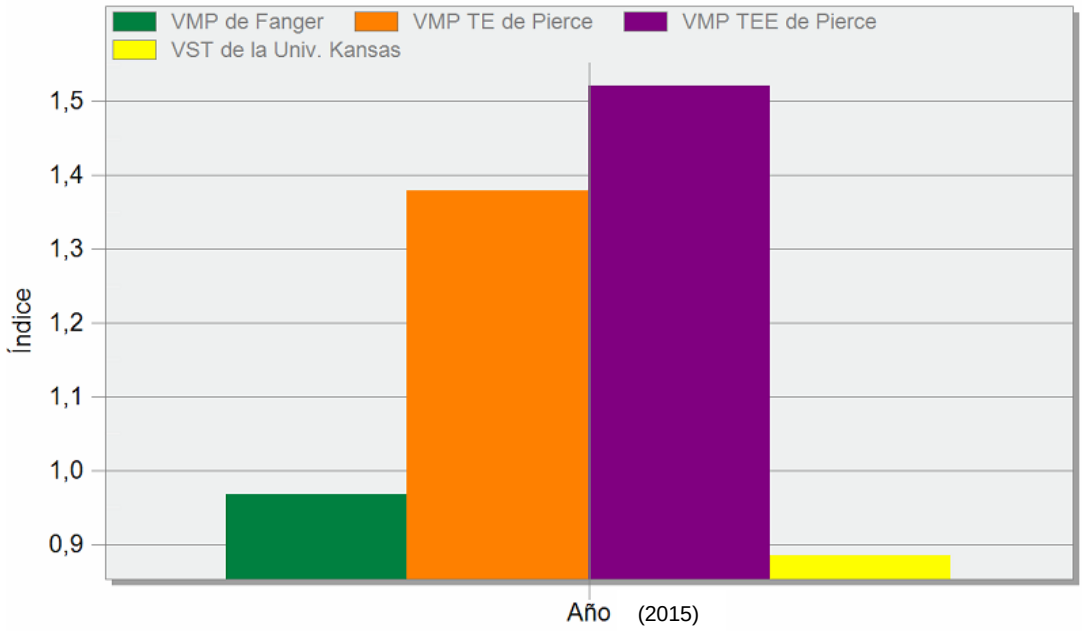
Los resultados anuales de la temperatura del aire sugieren un ambiente térmico interior confortable durante todo el año en la mayoría de los espacios del edificio. El valor promedio anual de la temperatura del aire es de 25,55 º C, mientras que la humedad relativa promedio presenta un valor anual promedio cercano al 70%. Sin embargo, un estudio de los resultados por zona reveló espacios con valores anuales promedio de temperatura del aire por encima de 28 º C, tal es el caso de espacios con gran cantidad de equipos y ocupación como las salas de estudio individual y grupal, la oficina del IEEE; o espacios con alta incidencia de radiación solar sobre sus cerramientos como el Aula 202.

En zonas con cubierta exterior en sus cerramientos como los espacios del Área Administrativa del quinto piso y el Aula 402 se encontraron valores anuales promedio

de la temperatura del aire entre los 26 y 27 º C. Dichos valores pudiesen ser más elevados sin el efecto de aislante térmico del techo verde.

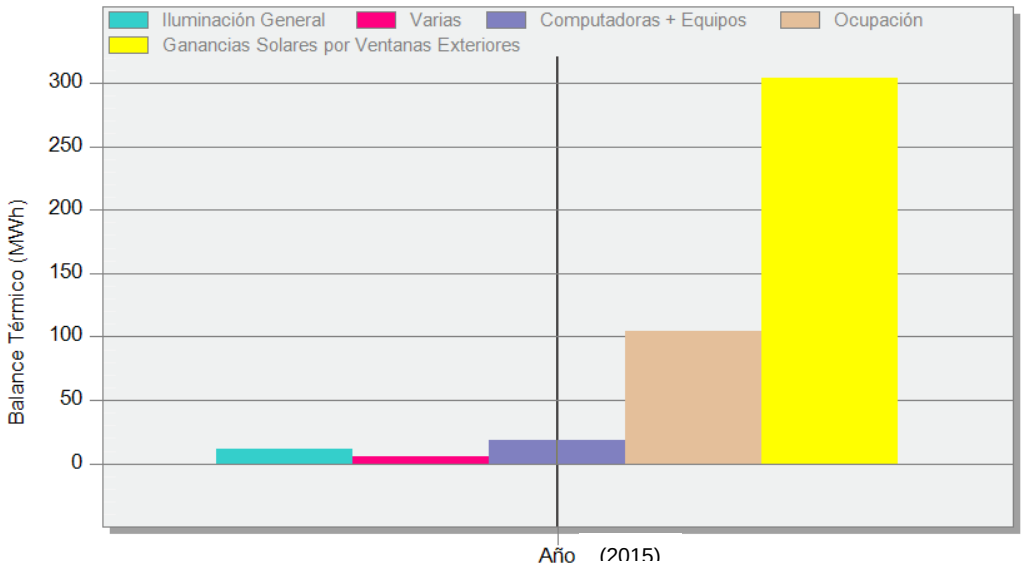
DesignBuilder también permite analizar el confort térmico a través de índices estandarizados. Los índices VST de la Universidad de Kansas y VMP de Fanger sugieren un ambiente térmico interior que esta entre confortable y ligeramente caluroso. La Figura 14 muestra los resultados de los índices VMP TEE de Pierce y VMP de Pierce, estos sugieren un ambiente térmico interior entre ligeramente caluroso a caluroso.

Figura 14. Índices del confort térmico del Edificio de Ingeniería Eléctrica.



La Figura 15 muestra los resultados de las ganancias térmicas interiores. Estos revelaron que la fuente más importante para el calentamiento de los espacios del edificio es la ganancia solar por acristalamientos exteriores (68 % del total de las ganancias térmicas interiores). También se encontró la influencia de otras fuentes de calentamiento como las ganancias térmicas por ocupación (23 %) y las ganancias térmicas asociadas a computadores y equipos (4,24 %).

Figura 15. Valores anuales de las ganancias térmicas interiores del Edificio de Ingeniería Eléctrica.



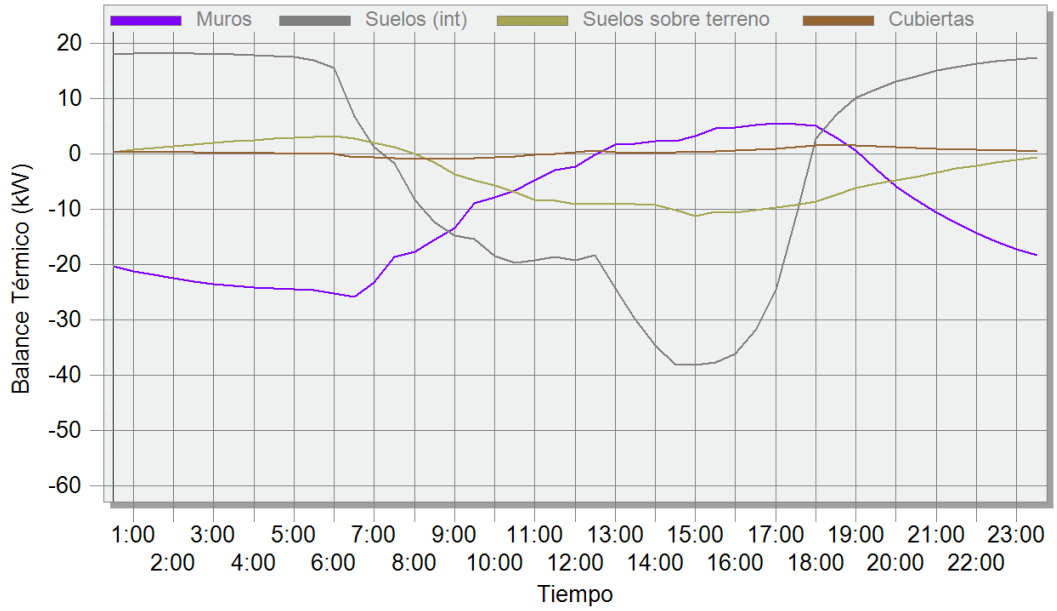
Los espacios con mayores ganancias solares por acristalamientos exteriores se encuentran ubicados en los pisos 3, 4 y 5. Mientras que los espacios con mayores ganancias térmicas por ocupación, computadores y equipos corresponden con las salas de estudio grupal e individual.

Las fuentes de calentamiento más relevantes en el Aula 202 y la Sala de Estudio Individual son la ocupación y las ganancias solares por acristalamientos exteriores. Mientras que en la Sala de Estudio Grupal son las ganancias solares por acristalamientos exteriores. Por el contrario, para la oficina del IEEE, la mayor fuente de calentamiento está en los equipos y computadores.

La Figura 16 presenta los resultados del balance térmico en cerramientos. Éstos fueron analizados para el día crítico[22] (viernes 29 de marzo). Los mayores valores de ganancias térmicas se presentan en los suelos interiores (placas entrepiso) en horarios nocturnos. Esto sugiere que dicho elemento juega un rol importante en la disipación de calor acumulado en las zonas. Los suelos sobre el terreno presentan un comportamiento similar.

[22] Día del año que presenta la temperatura exterior de bulbo seco más desfavorable según el archivo de datos climáticos.

Figura 16. Ganancias térmicas en cerramientos del Edificio de Ingeniería Eléctrica para el día crítico del 2015.



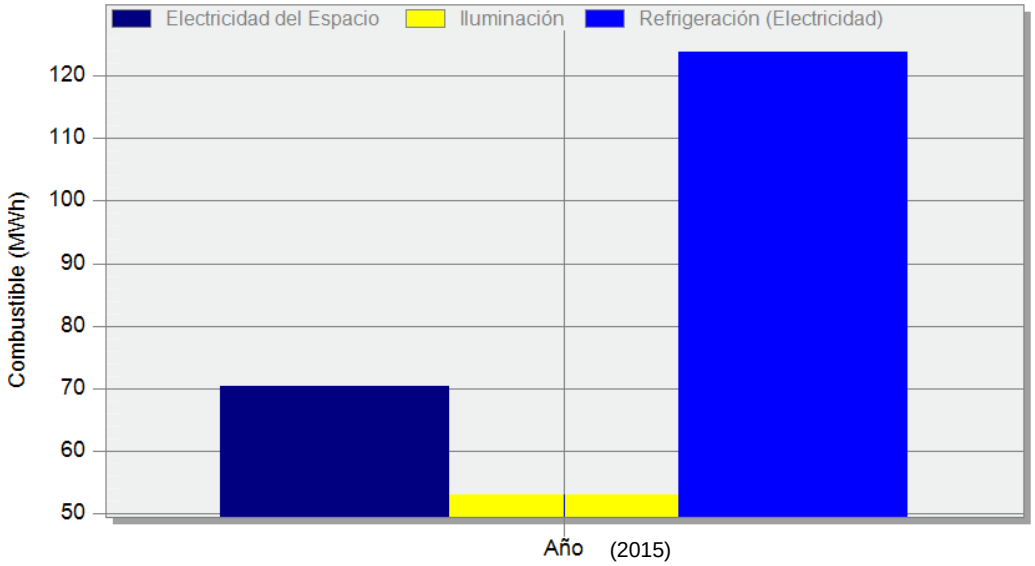
Los muros exteriores presentan una ganancia térmica máxima de 5,53 kWh a las 17 horas. Una comparación de los resultados del balance térmico para zonas con diferente tipo de muro exterior evidenció un efecto de inercia térmica en los muros exteriores de Drywall con respecto a los de ladrillo. Dicho efecto es generado por el aire al interior de las láminas de Drywall.

Las cubiertas registran una ganancia térmica máxima de 1,58 kWh, la menor ganancia con respecto a los demás cerramientos. Este comportamiento es debido al efecto de aislamiento proporcionado por la estrategia de techo verde. En cuanto a emisiones de gases contaminantes, el Edificio de Ingeniería Eléctrica emite aproximadamente 33 721 kg de CO_2 a la atmosfera.

- **Análisis del comportamiento energético del Edificio de Ingeniería Industrial**

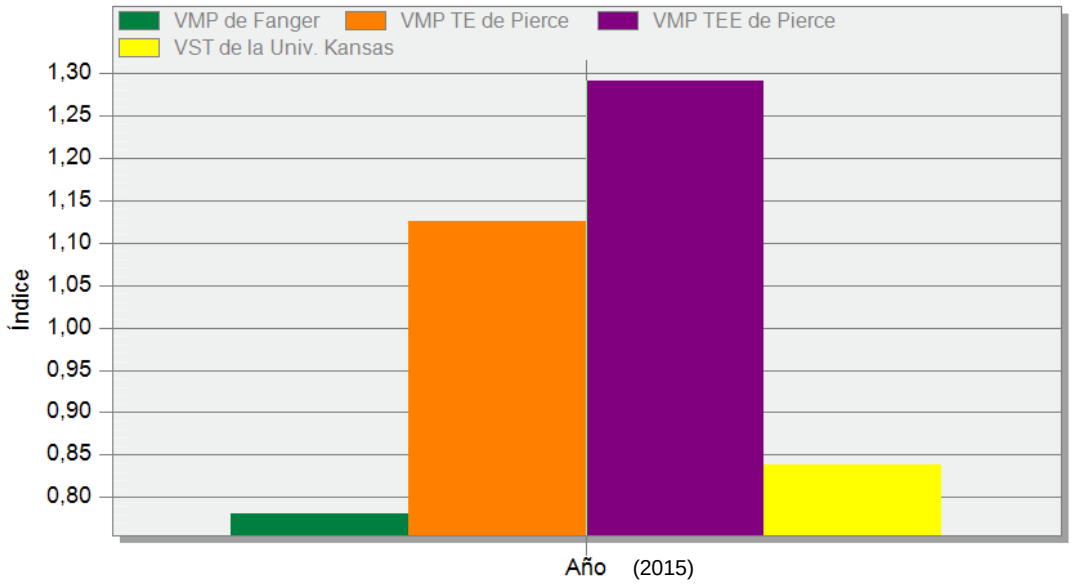
La Figura 17 se muestra los resultados del desglose del consumo energético anual. De acuerdo con éstos, el consumo energético anual simulado del Edificio de Ingeniería Industrial asciende a 247 345 MWh, de los cuales el 28,2 % corresponde al consumo de equipos instalados y otros que se pueden conectar, 21,2 % a iluminación y 50,7 % a refrigeración.

Figura 17. Desglose del consumo energético anual del Edificio de Ingeniería Industrial.



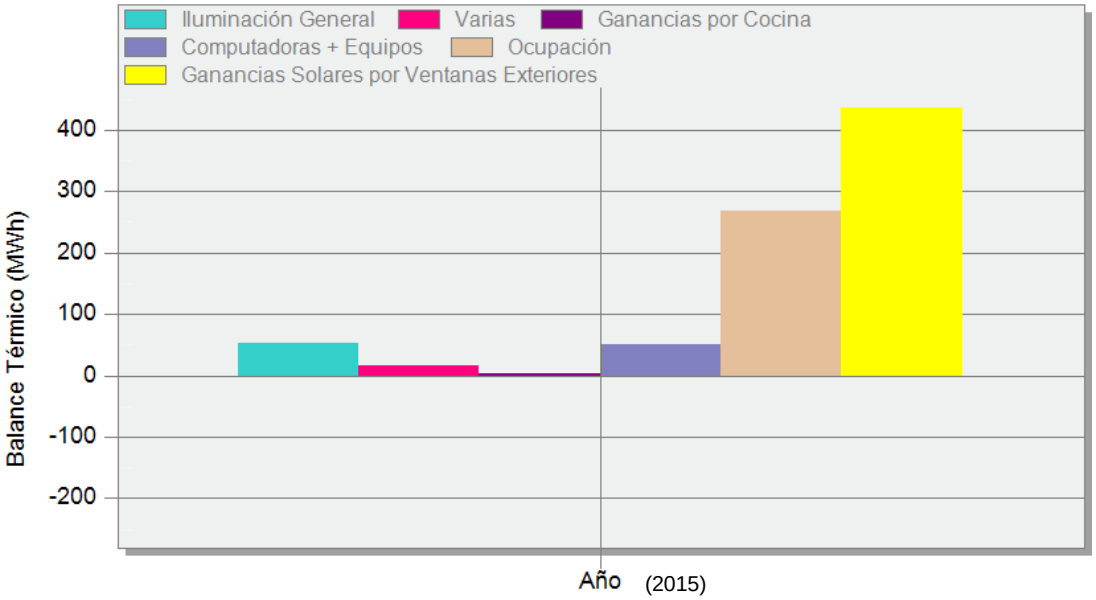
El valor anual promedio de la temperatura del aire en el edificio es de 26,3 º C. La humedad relativa está cerca del 60 %. Estos valores son debidos a que la mayoría de espacios del edificio se encuentran climatizados artificialmente. De acuerdo con la Figura 18, todos los índices del confort térmico presentan valores cercanos a uno, esto sugiere un ambiente interior entre neutral y ligeramente caluroso.

Figura 18. Índices del confort térmico del Edificio de Ingeniería Industrial.



Los resultados de ganancias térmicas interiores mostrados en la Figura 19 presentan un comportamiento similar a los encontrados en el Edificio de Ingeniería Eléctrica. Las principales fuentes de calentamiento de los espacios son las ganancias solares por ventanas exteriores y la ocupación. Éstas representan el 52,4% y 32,3% del total de ganancias interiores, respectivamente.

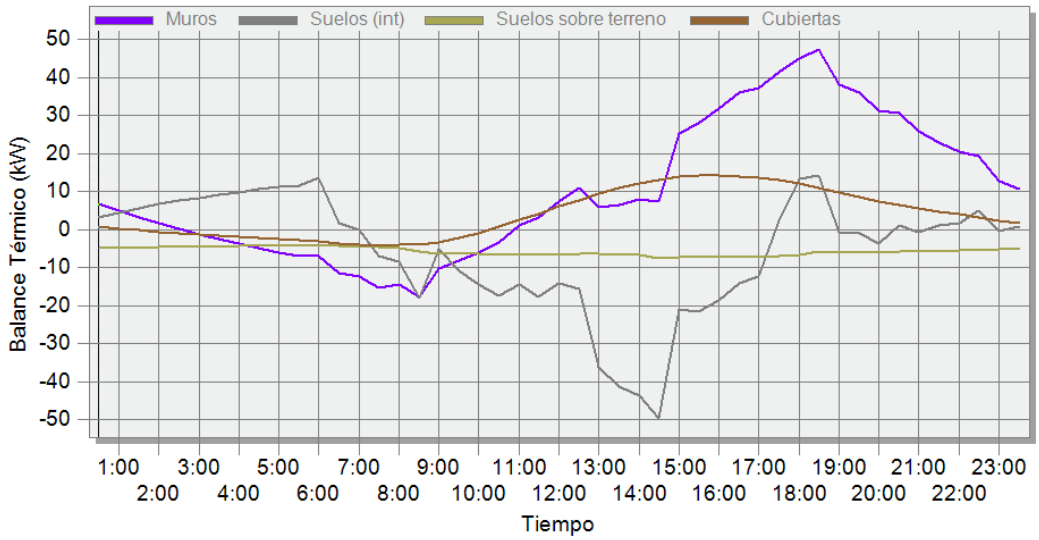
Figura 19. Ganancias térmicas interiores en el Edificios de Ingeniería Industrial.



Otras fuentes de calentamiento importante son las ganancias térmicas asociadas a la iluminación general (6,3%) y a computadores y otros equipos (6,1 %). La Figura 20 presentan los resultados del balance térmico de los cerramientos para el día crítico. Éstos revelaron que las mayores ganancias térmicas están asociadas a los muros exteriores y las cubiertas, con valores máximos de 47,4 kWh y 14,18 kWh respectivamente

Al observar el comportamiento diario del balance térmico en los muros exteriores se evidencia un efecto de acumulación térmica durante el periodo de tiempo comprendido entre las 8:30 y las 18:30. Éste se debe a la poca inercia térmica de los materiales que componen estos elementos. La cubierta presenta un comportamiento similar al de los muros exteriores.

Figura 20. Ganancias térmicas en cerramientos del Edificio de Ingeniería Industrial para el día crítico.



Los suelos interiores (placas de entrepiso) presentan un comportamiento opuesto al de los muros y cubiertas. La mayor pérdida térmica de este elemento (49,7 kWh) se presenta a las 14:30 p.m. En el caso de los suelos sobre el terreno se presentan un comportamiento casi invariable debido al efecto de estabilización térmica que provocan el aire acondicionado y la temperatura constante de la tierra.

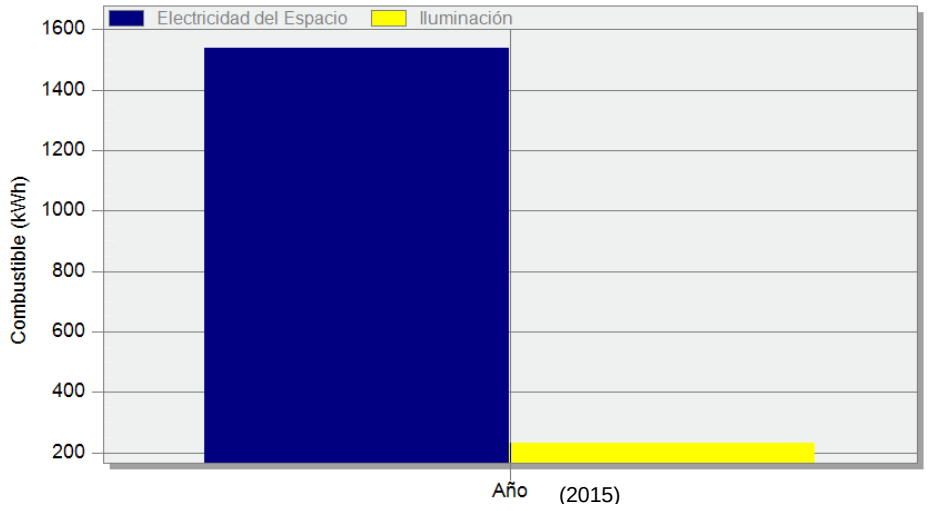
En cuanto a emisiones de gases contaminantes, el consumo energético del Edificio de Ingeniería Industrial representa 169 355,3 kg de CO_2 a la atmosfera; lo cual corresponde a cinco veces más emisiones que el Edificio de Ingeniería Eléctrica.

- **Análisis comportamiento energético Vivienda de Interés Social**

El consumo energético simulado de la vivienda es de aproximadamente 1 770,51 kWh/ año. Los resultados del desglose del consumo energético mostrados en la Figura 21 muestran que el consumo eléctrico de los equipos que se pueden conectar del espacio representa aproximadamente el 86,9 %, mientras que el consumo por iluminación el 13,1 %. La temperatura interior anual promedio de la vivienda es de 26,6 ºC. Sin embargo los espacios de la planta alta presentan una temperatura anual promedio de 27,23 ºC, valor aproximadamente 2 grados Celsius por encima de lo encontrado en la

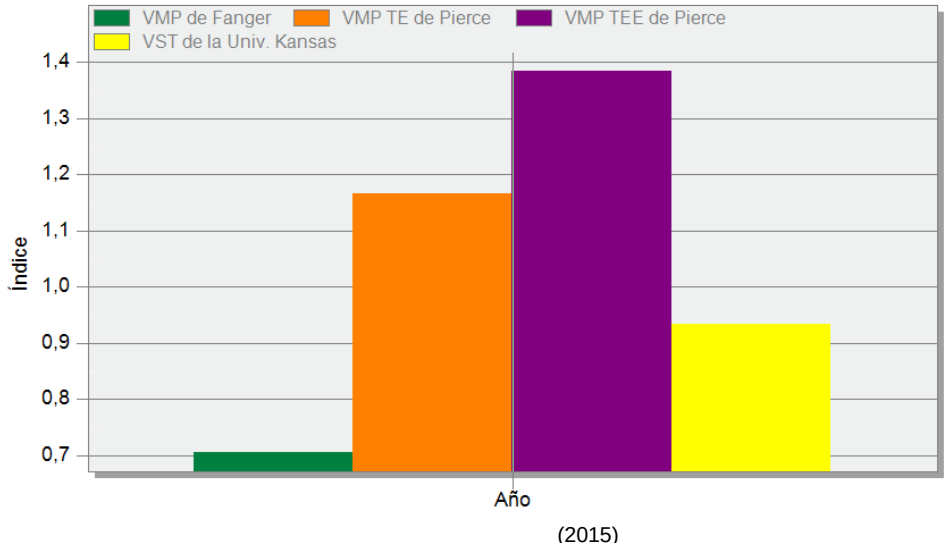
planta baja. Éste incremento de temperatura está relacionado con las ganancias térmicas por cubierta.

Figura 21. Desglose del consumo energético de la vivienda de interés social.



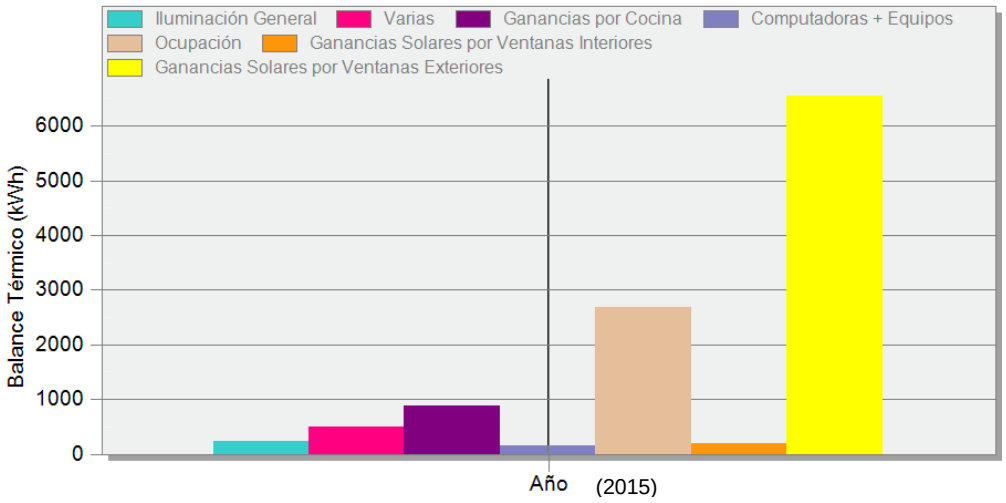
La Figura 22 muestra los resultados de la evaluación del confort térmico mediante indicadores. Los índices de VMP de Pierce y VMP TEE de Pierce sugieren un ambiente térmico interior entre ligeramente caluroso y caluroso. Mientras que los índices VMP de Fanger y VST de la Universidad de Kansas sugieren un ambiente térmico entre neutral y ligeramente caluroso.

Figura 22. Índices del confort térmico para la vivienda de interés social.



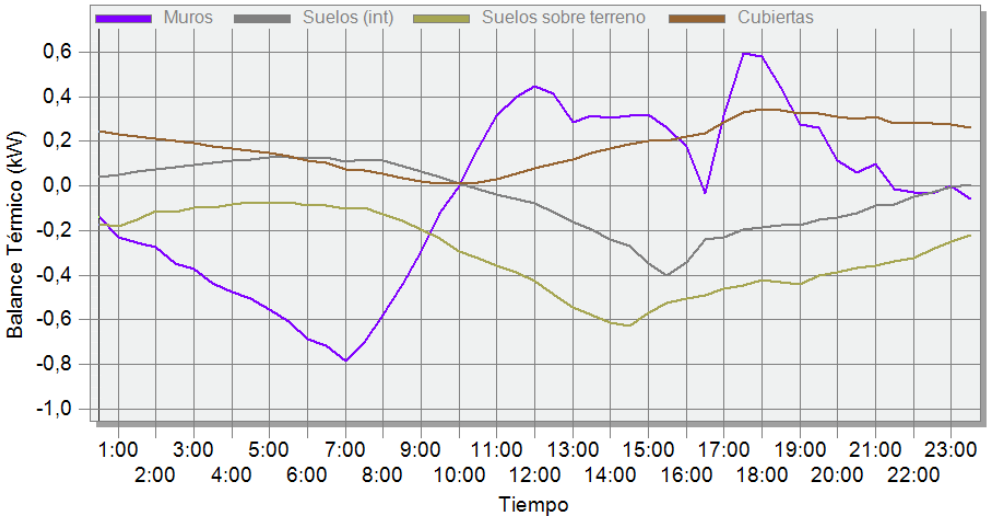
Según los resultados de las ganancias térmicas interiores mostrados en la Figura 23, las ganancias internas por ventanas exteriores y ocupación representan las principales fuentes de calentamiento de los espacios de la vivienda, con 58,5 % y 24%. También se encontró un aporte importante de ganancias térmicas interiores cercano al 8% asociado a los procesos de procesamiento de alimentos.

Figura 23. Ganancias térmicas interiores vivienda de interés social.



En la Figura 24 se muestran los resultados del balance térmico de cerramientos para el día crítico. En estos los elementos con mayores ganancias térmicas son los muros exteriores y la cubierta con valores máximos aproximados a 0,6 kWh y 0,35 kWh.

Figura 24. Balance térmico de cerramientos en el día crítico para la vivienda de interés social.



Los resultados del balance térmico en los cerramientos muestran un comportamiento atípico en los muros exteriores. Este se debe a la variación del efecto de la radiación solar sobre los diferentes cerramientos por causa de la trayectoria solar y el sombreamiento de viviendas adyacentes.

En el caso de la cubierta, las mayores ganancias térmicas se dan en el periodo de 10 a 18 horas, intervalo en el que se produce un soleamiento directo sobre la misma. De igual forma se evidencia un efecto de descarga térmica durante la noche.

Los pisos interiores y sobre el terreno captan ganancias térmicas en horas de la noche. Se infiere que estos son calentados por efecto de la radiación térmica emitida por la cubierta en su proceso de descarga y la ocupación. La Tabla 28 resume los hallazgos claves del desempeño energético de las edificaciones seleccionadas.

Tabla 28. Resumen hallazgos claves del comportamiento energético de las edificaciones objeto de estudio.

Edificio	Aspectos positivos	Aspectos negativos
Edificio de Ingeniería Eléctrica	- Reducción de temperatura y ganancias térmicas en espacios interiores por efecto de la cubierta verde. - Alta inercia térmica de los muros de Drywall.	- Valores elevados de ganancias térmicas interiores por acristalamientos exteriores. - Disconfort térmico en espacios con alta ocupación y equipos de cómputo.
Edificio de Ingeniería Industrial	- Nivel aceptable de confort térmico.	- Valores elevados de ganancias térmicas interiores por acristalamientos exteriores. - Valores elevados de ganancias térmicas en muros y cubierta. - Valor elevado de consumo energético por climatización.
Vivienda de Interés Social	- Mitigación de ganancias térmicas en cerramientos por efecto del sombreado de edificaciones adyacentes.	- Valores elevados de ganancias térmicas en la cubierta - Valores elevados de ganancias térmicas interiores por acristalamientos exteriores.

5.2.2. Fase 2: Modelado y simulación del Edificio de referencia

Para la evaluación comparativa de indicadores de desempeño energético se considera el uso valores limites personalizados como el recomendado en el apéndice G del estándar ASHRAE 90.1. Por tal motivo, se hace necesario crear un modelo virtual adicional (modelo virtual base) para el Edificio de Ingeniería Eléctrica y el Edificio de Ingeniería Industrial siguiendo las recomendaciones de dicho estándar. Para la vivienda de interés social no se generó un modelo virtual base, debido a que dicho estándar restringe su uso para edificaciones con sistemas mecánicos de climatización [85].

De acuerdo con el Apéndice G del estándar ASHRAE 90.1, los modelos virtuales base de edificaciones construidas deben ser generados conservando la forma, materiales constructivos y régimen de ocupación del edificio a evaluar. Sin embargo, se recomienda ajustar la potencia de iluminación y el área de acristalamiento (valor máximo permitido de 40 % de la relación ventana/pared). También se recomienda eliminar cualquier estrategia de ahorro energético y protección solar.

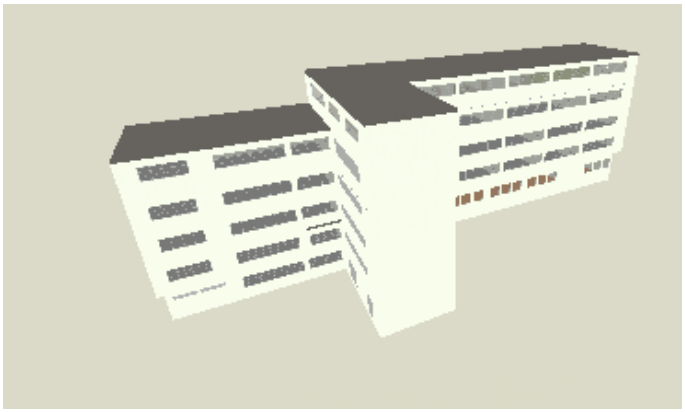
Teniendo en cuenta el uso, número de pisos y área de los edificios, el estándar recomienda definir para ambas edificaciones un sistema de climatización del tipo “paquete piso techo VAV con recalentamiento, refrigeración por expansión directa y calefacción por resistencia eléctrica”. Dicho sistema está incluido dentro de las plantillas de DesignBuilder. Sin embargo, por tratarse de edificaciones en zona tropical solo fue habilitado el funcionamiento de la refrigeración. El dimensionamiento de las capacidades de los sistemas de refrigeración se realizó para el día crítico con la herramienta de “Diseño de Refrigeración” de DesignBuilder.

El estándar también sugiere un valor límite para el número anual de *Unmet Hours*[23] de los modelos virtuales base. Sin embargo, dicha restricción no fue considerada debido a que las características no continuas de la envolvente no garantizan condiciones de estanqueidad en los espacios climatizados de las edificaciones.

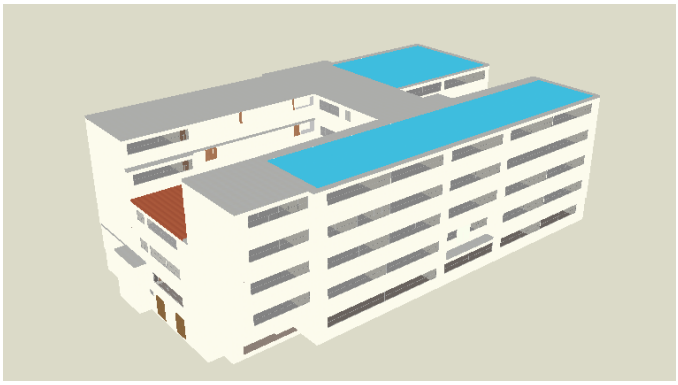
La Figura 25 muestra la representación geométrica de los modelos virtuales base del Edificio de Ingeniería Eléctrica y el Edificio de Ingeniería Industrial.

[23] Horas de un edificio donde el punto de ajuste de refrigeración de una zona no se cumple.

Figura 25. Modelos virtuales base.



A) Modelo virtual base del Edificio de Ingeniería Eléctrica.



B) Modelo virtual base del Edificio de Ingeniería Industrial.

En total, se realizaron dos simulaciones energéticas en esta fase, una con cada modelo virtual base teniendo en cuenta la orientación real de la edificación.

5.2.3. Fase 3: Evaluación comparativa por indicadores de desempeño

En esta fase se realiza la cuantificación de cuatro indicadores de desempeño energético: indicador global de desempeño energético (IGDE), indicador de desempeño energético en refrigeración (IDER), indicador de desempeño energético en iluminación (IDEI) e indicador de emisiones de gases de CO_2 (IEG). Éstos indicadores fueron seleccionados considerando los hallazgos de la revisión bibliográfica y las limitaciones en resultados de DesignBuilder.

Los resultados de simulación involucrados en la estimación de los indicadores son el consumo energético anual total, el consumo energético anual en refrigeración, el consumo energético anual en iluminación y las emisiones anuales de CO_2. Dichos

resultados son mostrados en la Tabla 29 y fueron obtenidos de las simulaciones del modelo virtual real y el modelo virtual base de los Edificios de Ingeniería Eléctrica e Ingeniería Industrial.

Tabla 29. Resultados de simulación útiles para la estimación de los indicadores de desempeño energético.

Resultado de simulación	Edificio de Ingeniería Eléctrica		Edificio de Ingeniería Industrial	
	Modelo real	Modelo base	Modelo real	Modelo base
Consumo energético anual total [kWh]	49 228,3	216 127,4	247 234,1	528 702,9
Consumo energético anual en refrigeración [kWh]	12 756,3	113 445,3	123 811,8	282 160,8
Consumo energético anual en climatización [kWh]	11, 816,4	45 590,8	53 011,2	108 538,2
Emisiones anuales de CO_2 [kg de CO_2]	33 721	148 043,3	169 355,3	362 161,56

Usando los resultados mostrados anteriormente y el área de cada una de las edificaciones, se procedió con la cuantificación de los indicadores a partir de las siguientes expresiones:

$$Indicador\ Global\ de\ Desempeño\ Energético\ (IGDE) = \frac{CEAT}{A_{Edif}}\left[\frac{kW}{m^2}\right]$$

$$Indicador\ de\ Desempeño\ Energético\ en\ Refrigeración\ \ (IDER)\ = \frac{CEAR}{A_{Edif}}\left[\frac{kW}{m^2}\right]$$

$$Indicador\ de\ Desempeño\ Energético\ en\ Iluminación - (IDEI)\ = \frac{CEAI}{A_{Edif}}\left[\frac{kW}{m^2}\right]$$

$$Indicador\ de\ emisiones\ de\ gases\ de\ CO_2 - (IEG)\ = \frac{EAG}{A_{Edif}}\left[\frac{kg\ de\ CO_2}{m^2}\right]$$

Dónde:

$CEAT$: Consumo energético anual total.

$CEAR$: Consumo energético anual en refrigeración.

$CEAI$: Consumo energético anual en iluminación.

EA: Emisiones anuales de CO_2.

A_{Edif}: Área total ocupada del edificio.

La Tabla 30 presenta los valores de los indicadores de desempeño correspondientes al modelo virtual real y base de los Edificios de Ingeniería Eléctrica e Ingeniería Industrial.

Tabla 30. Indicadores de desempeño energético Edificios de Ingeniería Eléctrica e Ingeniería Industrial.

Indicador	Edificio de Ingeniería Eléctrica			Edificio de Ingeniería Industrial		
	Real	Base	Ahorro %	Real	Base	Ahorro %
IGDE kWh/m^2	17,6	77,4	77,2	36,8	78,7	53,2
IDER kWh/m^2	4,6	40,6	88,8	18,4	42,0	56,1
IDEI kWh/m^2	4,2	16,3	74,1	7,9	16,2	51,2
IEG [kg CO_2 / m^2]	12,1	53,1	77,2 %	22,2	53,9	58,8

De acuerdo con los resultados mostrados, el Edificio de Ingeniería Eléctrica presenta un indicador global de desempeño energético de 17,6 kWh/m^2, esto implica un ahorro energético del 77,2 % con respecto al edificio de referencia. Este ahorro es evidente en los indicadores de desempeño energético de refrigeración e iluminación, los cuales disminuyeron un 89% y 74% respectivamente por efecto de estrategias de ahorro como ventilación natural, iluminación natural por ventanales y tubos solares, y cubierta verde.

Para el Edificio de Ingeniería Industrial, el indicador global de desempeño energético muestra un ahorro aproximado del 53,2% con respecto al edificio de referencia. Los indicadores de desempeño energético en refrigeración e iluminación revelan una reducción aproximada del 56% y el 51% respectivamente. En este caso, estas reducciones se encuentran asociadas al uso de sistemas de climatización de alto COP y a la reducción de la potencia de iluminación.

Al considerar el IEG se encontró que el Edificio de Ingeniería Eléctrica presenta aproximadamente 50% menos de emisiones de CO_2 que el Edificio de Ingeniería

Industrial. Este mismo porcentaje fue encontrado al comparar las emisiones de los edificios evaluados con respecto a su referencia.

A partir de los resultados anteriores y considerando las diferencias significativas en cuanto al uso de energía que presentan los dos edificios analizados puede inferirse que el método de auto-referencia propuesto en el Apéndice G de la ASHRAE 90.1 no es el más adecuado para determinar el porcentaje de ahorro que representa una edificación en clima tropical. En este sentido, se requiere de la definición de un modelo de auto-referencia adaptado a las características propias de las edificaciones en el trópico.

Adicionalmente, se comparó el indicador global de desempeño energético de los dos edificios con la línea base de la Resolución 0549, la cual tiene un valor de 72 kWh/m^2 año. En el caso del Edificio de Ingeniería Eléctrica, se encontró un porcentaje de ahorro del 75,5%, mientras que para el Edificio de Ingeniería Industrial dicho valor fue del 48,9%. En ambos casos, el porcentaje de ahorro está por encima del 40%, valor mínimo aceptable para edificaciones de uso educativo en el clima cálido seco.

Esta comparación también se realizó para la vivienda de interés social. En este caso, el IGDE es de aproximadamente 38 kW/m^2 – año. Valor cerca del 10% superior a la línea base de la Resolución 0549 (34,6 kW/m^2 – año). Este comportamiento se debe al número significativo de electrodomésticos que presenta la vivienda estudiada.

Para valorar el desempeño energético de los edificios de Ingeniería Eléctrica e Ingeniería Industrial se evaluó el porcentaje de ahorro de cada edificación en las escalas de valoración del LEED NC[24], BREEAM[25] y CALENER[26]. La Tabla 31 muestra estos resultados.

[24] Sistema de evaluación, clasificación, y certificación ambiental y energética de edificaciones de oficina creado por el Green Building Council de Estados Unidos (USGBC). Actualmente de aplicación internacional, incluido Colombia [76].
[25] Sistema de evaluación, clasificación y certificación ambiental y energética del Reino Unido [76].
[26] Programa para la calificación energética de edificaciones del Ministerio de Industria, Comercio y Turismo de España [76].

Tabla 31. Valoración del desempeño energético de los Edificios de Ingeniería Eléctrica e Ingeniería Industrial, según sistemas de evaluación LEED, BREEAM y CALENER.

Escala	Edificio de Ingeniería Eléctrica	Edificio de Ingeniería Industrial
LEED [Puntos]	10	10
BREEAM [Puntos]	15	13
CALENER [Etiqueta]	A	B

De acuerdo con los resultados anteriores, el Edificio de Ingeniería Eléctrica presenta un mejor desempeño energético que el Edificio de Ingeniería Industrial según el sistema de valoración BREEAM. La evaluación con LEED NC otorga la misma puntuación a ambas edificaciones debido a que ambas edificaciones presentan un ahorro superior al 42%. Por su parte la escala CALENER permite diferenciar más claramente el desempeño energético de las dos edificaciones consideradas, debido a que esta escala solo posee tres intervalos diferenciados de desempeño. De acuerdo con esta escala el Edificio de Ingeniería Eléctrica presenta un mejor desempeño (Etiqueta A) con respecto al Edificio de Ingeniería Industrial (Etiqueta B).

Este capítulo permitió el establecimiento de un procedimiento para el análisis y evaluación del desempeño energético de edificaciones tropicales. Dos fases conforman dicho procedimiento: análisis del comportamiento energético y evaluación comparativa del desempeño energético mediante indicadores. En la primera fase se analizan los resultados de simulación que dan indicios claros sobre el comportamiento energético general de la edificación. Entre los resultados considerados se encuentra el desglose del consumo energético anual, índices de confort térmico, ganancias térmicas interiores y ganancias térmicas a través de cerramientos.

La segunda fase permite evaluar y valorar el desempeño energético de una edificación, no solo de forma global (todo el edificio) sino también de forma jerárquica (sistemas más importantes de la edificación). El método de evaluación empleado fue la evaluación comparativa mediante indicadores, éste fue seleccionado teniendo en cuenta restricciones como la ausencia de códigos energéticos y bases de datos de referencia. En total se tuvieron en cuenta cuatro indicadores: indicador global del desempeño energético (IGDE), indicador de desempeño energético en refrigeración (IDER), indicador de desempeño energético en iluminación (IDEI) e indicador de

emisiones de gases de CO_2 (IEG), su selección se realizó teniendo en cuenta hallazgos de artículos científicos y las restricciones propias de la HSE usada.

La cuantificación del porcentaje de ahorro que representa la edificación se realizó teniendo en cuenta valores de referencia de dos tipos, la línea base de la Resolución 0549 y el método de auto-referencia del Apéndice G de la ASHRAE 90.1. La valoración del desempeño energético se realizó de acuerdo con tres escalas de valoración energética: LEED, BREEAM Y CALENER.

6. HERRAMIENTA METODOLÓGICA PARA EL ANÁLISIS EFICIENTE DE SIMULACIONES ENERGÉTICAS DE EDIFICACIONES EN EL TRÓPICO

Este capítulo presenta una herramienta metodológica para el análisis eficiente de simulaciones energéticas de edificaciones en zonas tropicales, que puede ser usada en el análisis y evaluación del desempeño energético. Ésta fue construida a partir de los hallazgos más importantes de las búsquedas bibliográficas y el análisis de las edificaciones estudiadas en capítulos previos.

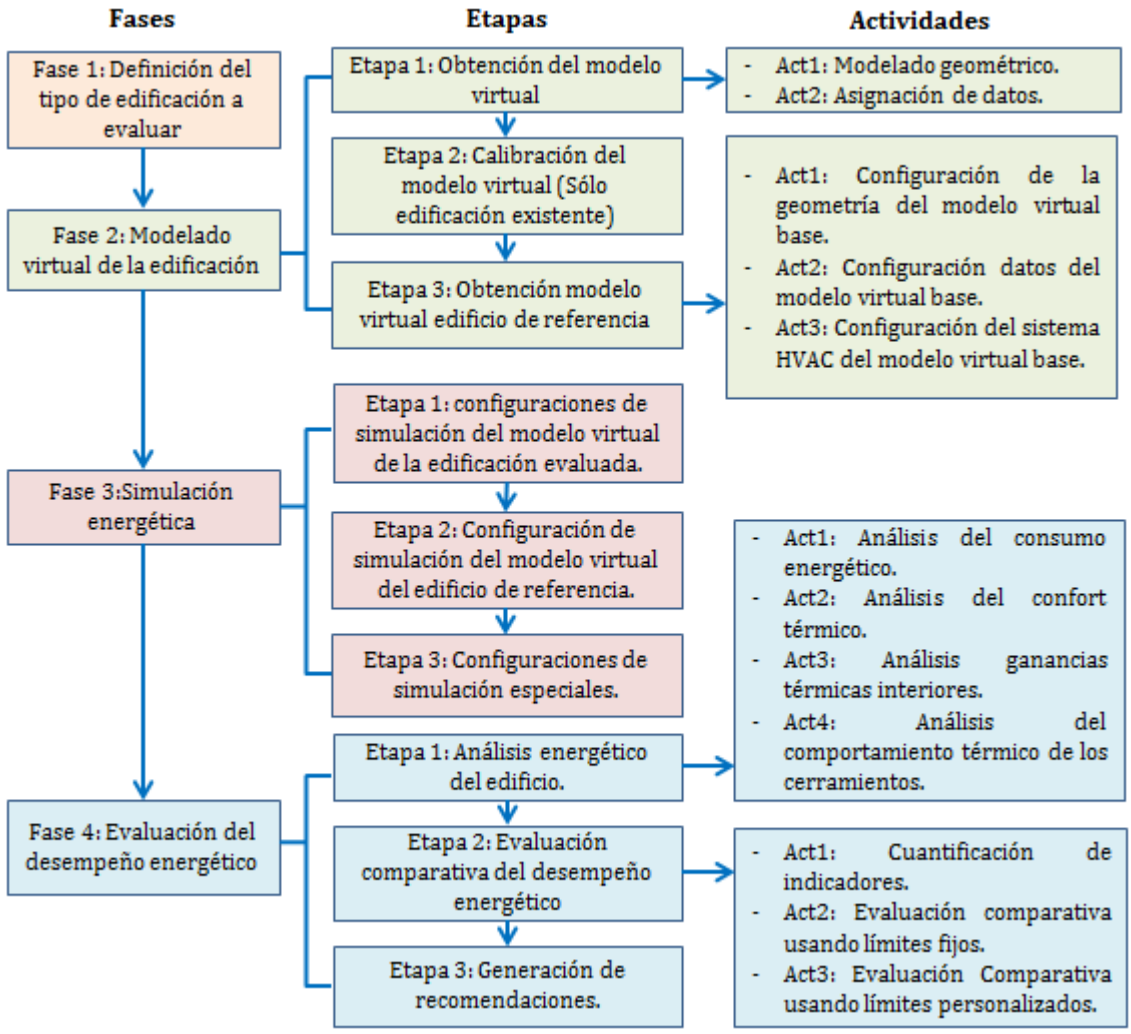
Esta herramienta propone la evaluación del desempeño energético de una edificación a través del uso del método de evaluación comparativa mediante indicadores. En total, se comparan cuatro indicadores: indicador global de desempeño energético – IGDE, indicador de desempeño energético en refrigeración – IDER, indicador de desempeño energético en iluminación – IDEI y el indicador de emisiones de gases de CO_2 – IEG. Dicho método e indicadores fueron determinados en el Capítulo 5 a través de una revisión de literatura y de resultados de simulación.

Como referencia se tomaron los valores límites de dos tipos: valores límite fijos y valores límite personalizados. Los valores límite fijos corresponden con la línea base de consumo energético de la Resolución 0549 del Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio. Mientras que los valores límite personalizados corresponden con los obtenidos mediante el método del edificio de auto-referencia recomendado en el Apéndice G de la ASHRAE 90.1.

La herramienta metodológica se compone de cuatro fases organizadas en forma secuencial: i) definición del tipo de edificación a evaluar, ii) modelado virtual, iii) simulación energética y iv) evaluación del desempeño energético. Éstas han sido construidas en base a los principales hallazgos de los capítulos 1, 3, 4 y 5. La mayoría de las fases están compuestas por etapas, que a su vez incluyen pasos (etapas simples) o actividades (etapas complejas). Cada etapa contiene al menos una figura que describe el procedimiento a seguir para la consecución del objetivo de la etapa, el cual está planteado en la descripción de la misma.

La herramienta también brinda orientaciones en cuanto al comportamiento energético de la edificación evaluada, de forma que mediante el análisis de varios grupos de resultados de simulación el usuario pueda identificar causas de rendimientos energéticos inadecuados. Además se incluye una etapa (Etapa 3 de la Fase 4) de recomendaciones que brinda un conjunto de estrategias que permiten mejorar el desempeño energético de la edificación según las deficiencias encontradas en la etapa de análisis energético de la Fase 4. La Figura 26 muestra el esquema general de la herramienta metodológica.

Figura 26. Esquema general de la herramienta metodológica para la evaluación del desempeño energético de edificaciones en el trópico.

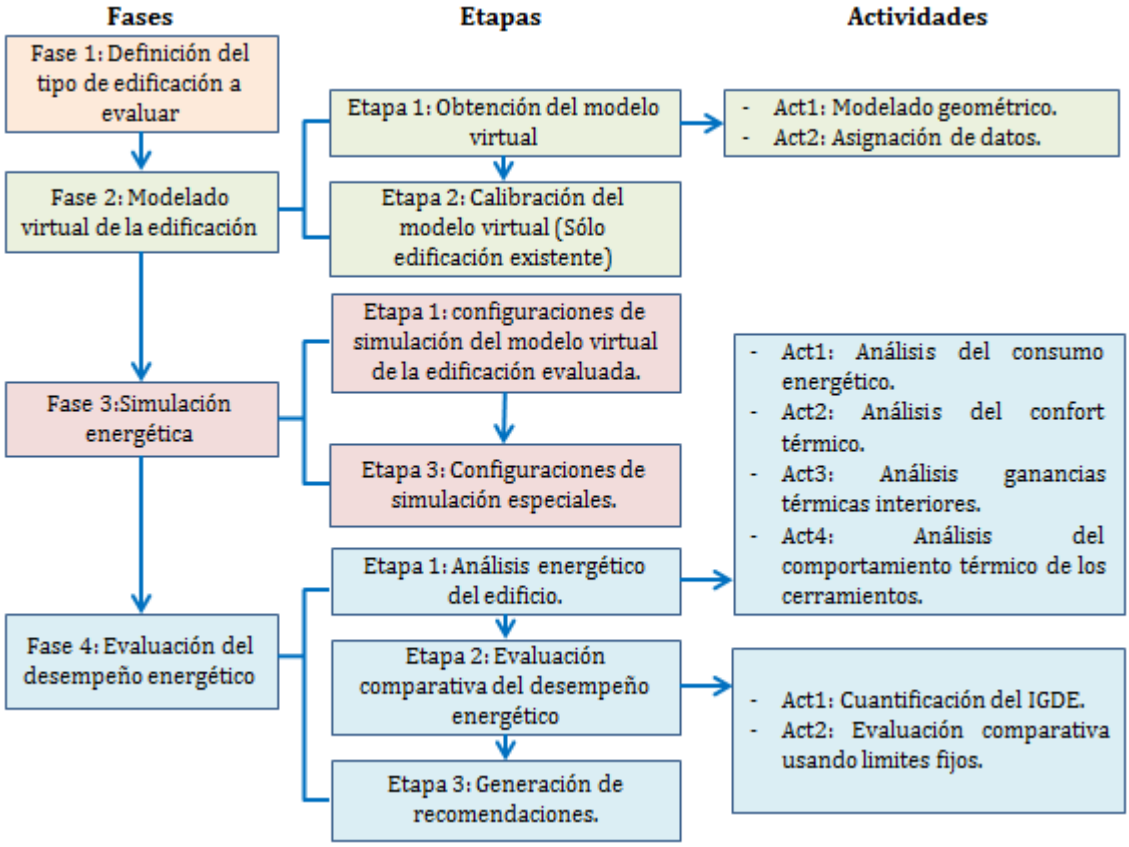


En cuanto al alcance de aplicación, esta herramienta metodológica puede ser usada para el análisis y evaluación del desempeño energético de edificaciones (en zonas

tropicales) existentes y en diseño de acuerdo con requisitos planteados en la Fase 1. De igual manera edificaciones de diverso tipo pueden ser consideradas como objeto de estudio, tales como educativas, oficinas, comerciales, salud y residencial de altura considerable (edificios multifamiliares).

Debido a las restricciones propias del método de auto–referencia (Apéndice G del ASHRAE 90.1) usado en la evaluación comparativa del desempeño energético, la herramienta metodológica no puede ser empleada en su totalidad para edificaciones residenciales de baja altura (viviendas unifamiliares). Para este caso específico se planteó una versión ajustada de la herramienta metodológica que incluye algunas modificaciones como la eliminación de la Etapa 3 de la fase de modelado virtual de la edificación, la Etapa 2 de la fase de simulación energética y la Actividad 3 de la Etapa 2 de la Fase de Evaluación del desempeño energético. La Figura 27 presenta el esquema general de la herramienta metodológica adaptada para ser usada en este caso.

Figura 27. Esquema general de la herramienta metodológica adaptada para la evaluación energética de edificaciones residenciales de baja altura.



La herramienta metodológica se encuentra adaptada a DesignBuilder, HSE que resultó seleccionada en el Capítulo 2. En caso de no usarla, se recomienda el uso de una HSE con características similares tal como EnergyPlus o cualquiera de sus interfaces gráficas. Además se deberá realizar la adaptación de los procedimientos de las fases de “Modelado virtual de la edificación” y “Simulación energética”. En la fase de “Modelado virtual de la edificación” según las particularidades de la herramienta empleada. En todo caso, la estructura general de la herramienta metodológica permanecerá invariable, así como las etapas y actividades asociadas a la fase de “Evaluación del desempeño energético”.

A continuación se describen cada una de las fases, etapas y actividades involucradas en la herramienta metodológica propuesta para el análisis y evaluación del desempeño energético de edificaciones en zonas tropicales.

6.1. FASE 1: DEFINICIÓN DEL TIPO DE EDIFICACIÓN A EVALUAR

La primera fase consiste en la definición del tipo de edificación a evaluar. A partir de ésta se establece la información de entrada requerida en las fases subsecuentes de la herramienta metodológica. Se plantean dos tipos de edificaciones: edificación en diseño y edificación construida. Las características y requerimientos de cada tipo de edificación son mostradas a continuación.

6.1.1. Edificación en proceso de diseño

Este tipo de edificación se encuentra en fases finales del proceso de diseño, por tal motivo se debe disponer de información completa de gran parte de sus componentes y sistemas. La evaluación del desempeño energético de edificaciones en proceso de diseño se realiza con el objetivo de verificar metas de diseño relacionadas con la eficiencia energética de la edificación o para la verificación del cumplimiento de la edificación con respecto a certificaciones y estándares. La aplicación de la herramienta metodológica requiere del cumplimiento de los siguientes requisitos:

- Diseño arquitectónico finalizado.
- Diseño eléctrico finalizado.
- Especificaciones de ingeniería finalizadas.
- Presencia de envolvente (cerramientos exteriores).
- Presencia de sistemas mecánicos de climatización.

6.1.2. Edificación existente

Este tipo de edificación ya se encuentra en la etapa de operación de su ciclo de vida. La evaluación del desempeño energético de una edificación construida tiene por objeto identificar causas relevantes de consumos excesivos de energía, así como estrategias de mejoramiento. La aplicación de la herramienta metodológica depende del cumplimiento de los siguientes requisitos:

- Un año o más de operación continua
- Disponibilidad de datos *as – Built*.
- Posibilidad de realizar visitas de inspección.
- Presencia de envolvente (cerramientos exteriores).
- Presencia de sistemas mecánicos de climatización.

Para la evaluación del desempeño energético de edificaciones residenciales de baja altura (viviendas unifamiliares) ya existentes o en diseño puede aplicarse o no el requisito de presencia de sistemas mecánicos de climatización.

6.2. FASE 2: MODELADO VIRTUAL DE LA EDIFICACIÓN

Esta fase tiene como objetivo la obtención de los modelos virtuales de la edificación a evaluar y su edificio de referencia en DesignBuilder. Dichos modelos son usados como insumo para el análisis y evaluación del desempeño energético. La fase de modelado virtual se compone de tres etapas: modelado virtual del edificio a evaluar, calibración del modelo virtual, y obtención del modelo virtual base.

6.2.1. ETAPA 1: Obtención del modelo virtual de la edificación a evaluar

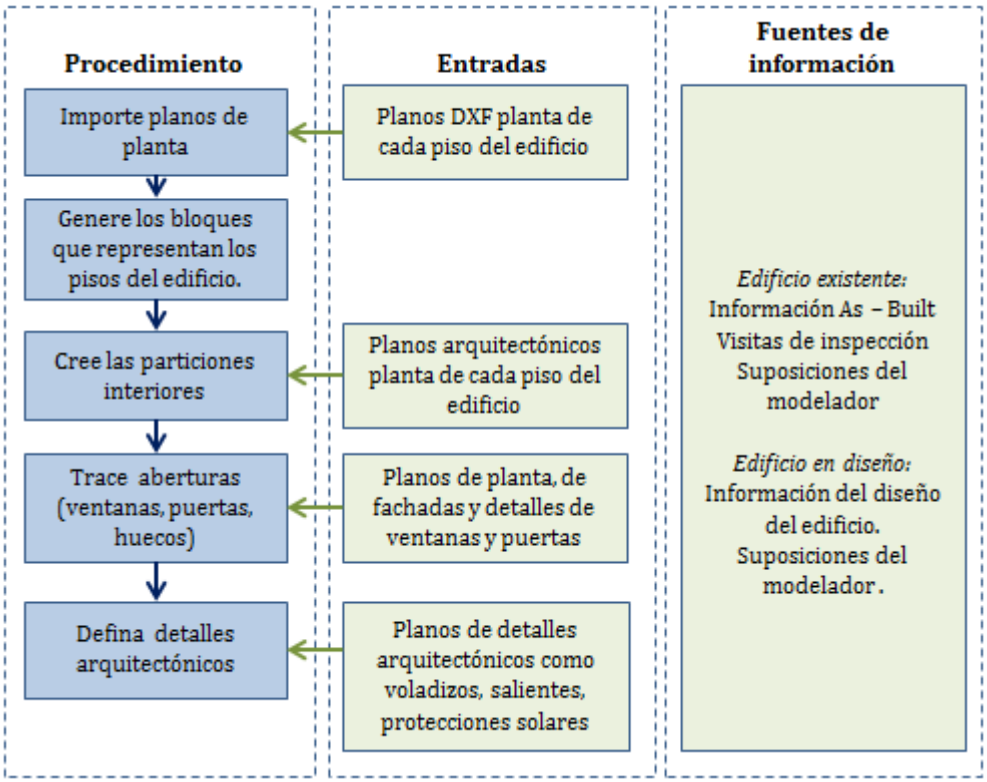
La etapa de modelado virtual del edificio a evaluar es común a los dos tipos de edificaciones consideradas en la Fase 1. Esta etapa se fundamenta en el proceso de modelo virtual desarrollado en el Capítulo 3 de este documento y está compuesta por dos actividades: modelado geométrico y asignación de datos del modelo, las cuales son descritas en detalle a continuación.

- **ACTIVIDAD 1: Modelado geométrico**

La obtención del modelo geométrico de la edificación se realiza en el panel de edición de DesignBuilder siguiendo una secuencia de cinco pasos: i) importación de planos de planta, ii) generación de bloques, iii) creación de particiones interiores, iv) trazado de

aberturas y v) definición de detalles arquitectónicos. Las principales entradas de esta actividad son los planos (planta, arquitectónicos, fachada, detalles, entre otros) de la edificación evaluada. Esta información será obtenida de diferentes fuentes dependiendo del tipo de edificación. La Figura 28 presenta el procedimiento de esta actividad.

Figura 28. Procedimiento de la actividad de modelado geométrico.



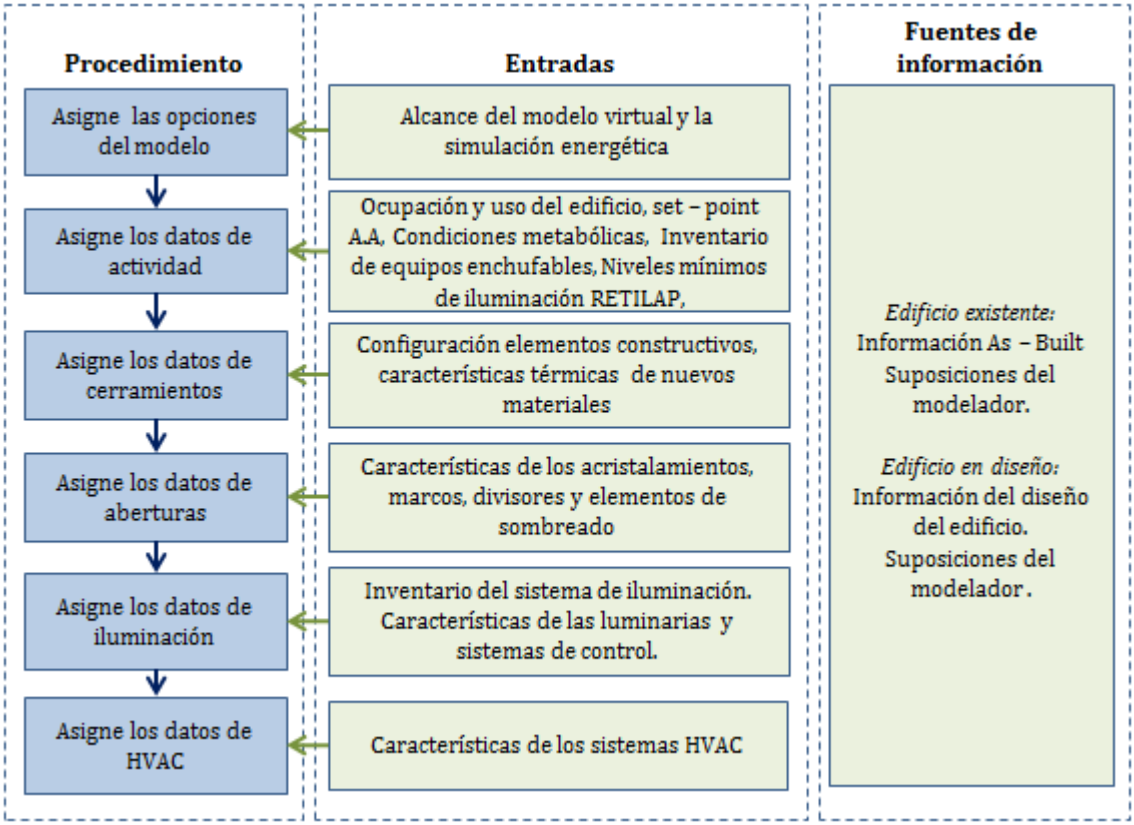
- **ACTIVIDAD 2: Asignación de datos**

Una vez concluido el modelo geométrico se procede a la asignación de datos que se compone de seis pasos relacionados con la configuración general del modelo virtual y las diferentes categorías de datos que se incluyen en la herramienta de simulación: i) asignación de las opciones del modelo, ii) asignación de los datos de actividad, iii) asignación de los datos de cerramientos, iv) asignación de los datos de aberturas, v) asignación de los datos de iluminación y vi) asignación de los datos de cerramientos.

Las entradas de esta actividad están relacionadas con aspectos del edificio como el régimen de uso y operación, características constructivas y materiales, características

de las aberturas (ventanas, puertas y huecos) cargas de equipos y electrodomésticos, cargas del sistema de iluminación, y características del sistemas de climatización o sistema HVAC. En la Figura 29 se presenta el procedimiento de esta actividad.

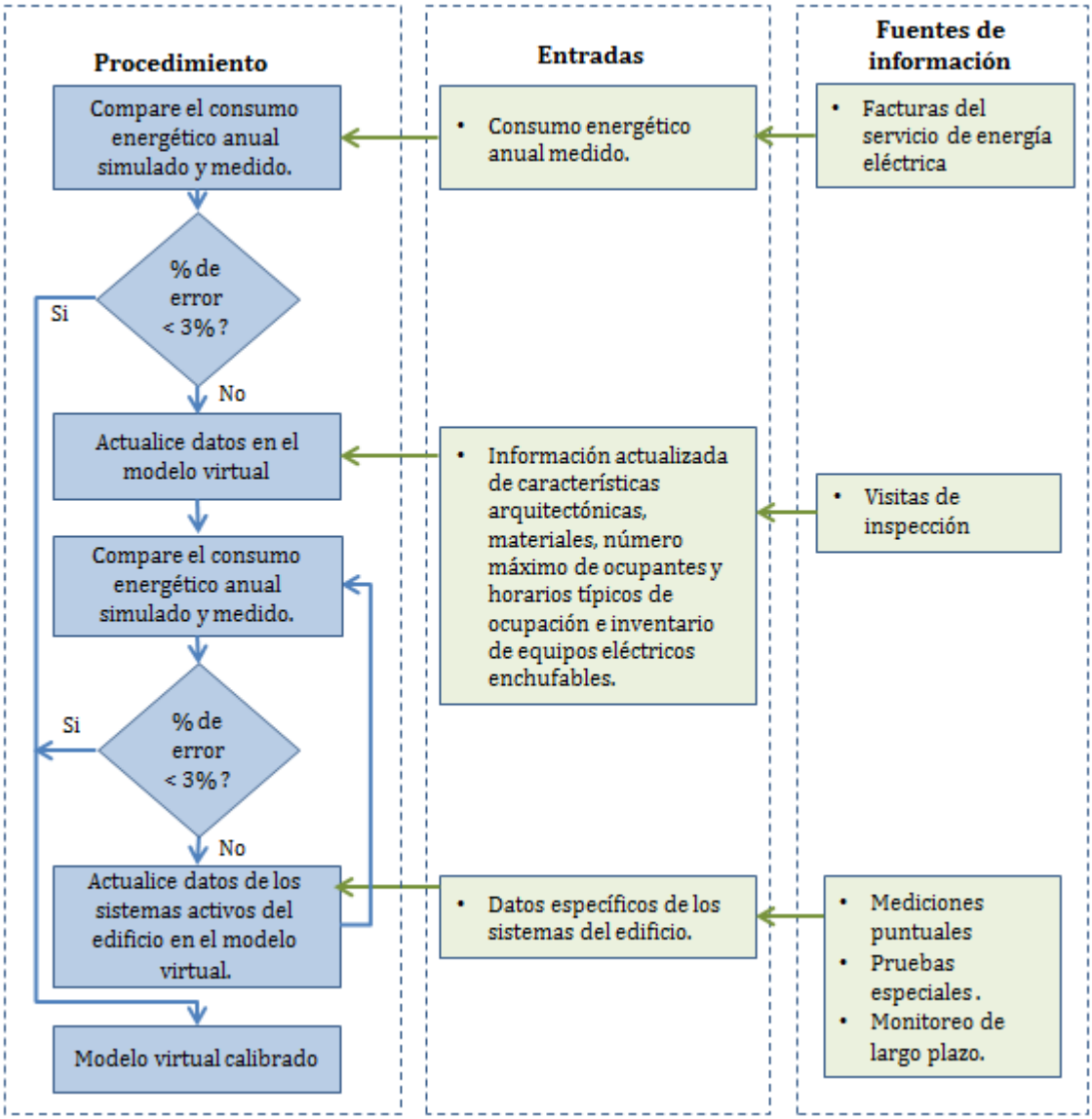
Figura 29. Procedimiento de la actividad de asignación de datos.



6.2.2. ETAPA 2: Calibración del modelo virtual

La etapa de calibración del modelo virtual es exclusiva de la evaluación del desempeño energético de edificaciones existentes y consiste en un proceso de ajuste del modelo virtual de la edificación a fin de mejorar la fiabilidad de los resultados de la evaluación del desempeño energético. Esta etapa se encuentra fundamentada en la metodología de calibración desarrollada en el Capítulo 4 de este documento, la cual se basa en dos niveles de calibración diferenciados por las fuentes y procedimientos usados para obtener y refinar las entradas del modelo virtual asociado a cada nivel. La Figura 30 presenta de manera general el procedimiento de calibración del modelo virtual.

Figura 30. Procedimiento de la actividad de calibración del modelo virtual.



Si se dispone de facturas mensuales del servicio eléctrico, la comparación para verificar el grado de ajuste del modelo virtual se deberá realizar entre el valor medido del consumo eléctrico de cada mes y el respectivo valor simulado, esto para un periodo mínimo de un año. En este caso se recomienda como criterio de aceptación un error mensual del 5%.

6.2.3. ETAPA 3: Obtención del modelo virtual de la edificación de referencia

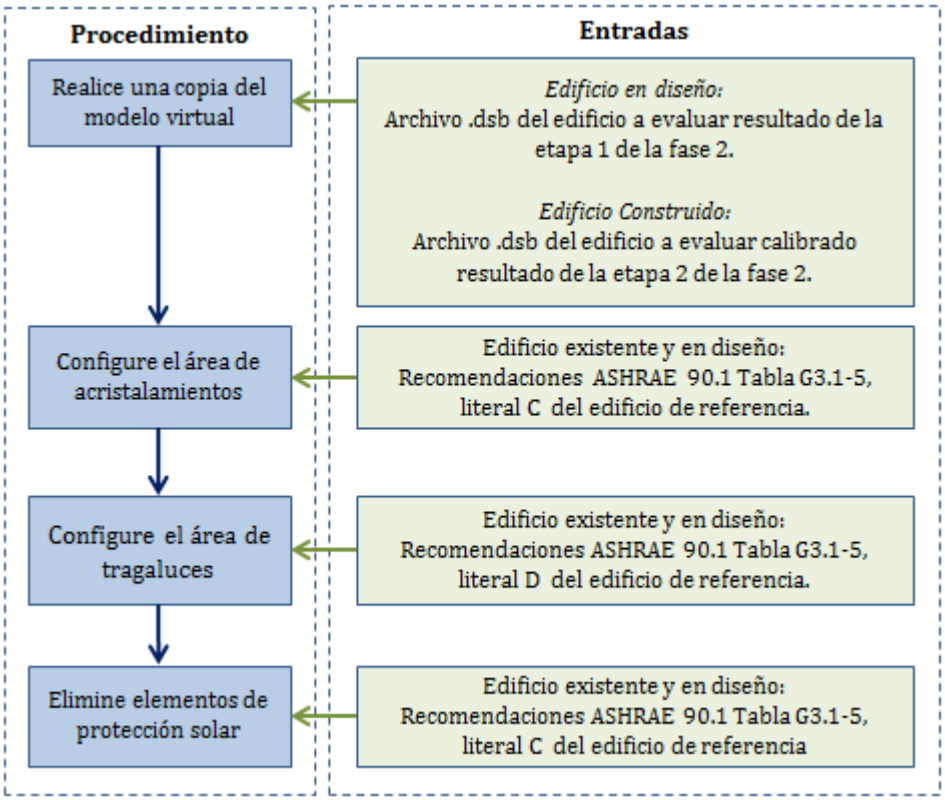
El propósito de esta etapa es generar el modelo virtual del edificio de referencia usado como valor límite personalizado de la evaluación comparativa del desempeño energético. Tres actividades componen esta etapa: configuración de la geometría del

modelo base, configuración de datos del modelo y configuración del sistema HVAC. Esta etapa está fundamentada en los hallazgos del Capítulo 5 de este documento.

- **ACTIVIDAD 1: Configuración de la geometría del modelo virtual del edificio de referencia**

Esta actividad tiene como punto de partida el modelo virtual del edificio a evaluar obtenido en la Etapa 1 de esta fase si se trata de un edificio en diseño, o en la Etapa 2 si se trata de un edificio existente. El objetivo principal consiste en la modificación de las características geométricas del modelo virtual del edificio a evaluar de acuerdo a las recomendaciones del Apéndice G de la ASHRAE 90.1. Dichas modificaciones están relacionadas con el área de acristalamiento (vertical y horizontal) y la configuración de los elementos de protección solar. La Figura 31 presenta el procedimiento de esta actividad.

Figura 31. Procedimiento de la actividad de configuración de la geometría del modelo virtual base.

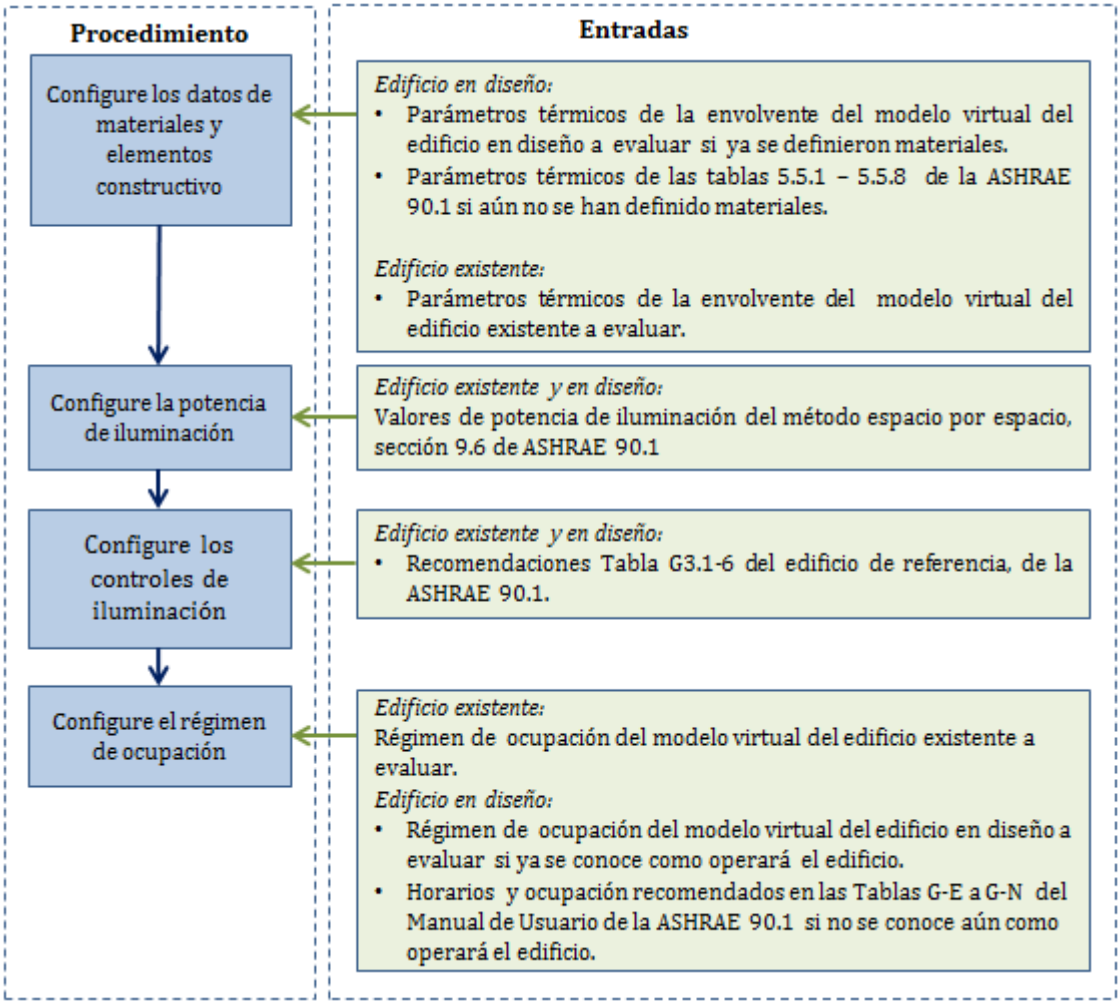


Otros elementos de la geometría del modelo virtual del edificio de referencia tales como el número de pisos y la distribución de zonas térmicas permanecen idénticos a los definidos en el modelo virtual del edificio a evaluar.

- **ACTIVIDAD 2: Configuración de los datos del modelo virtual del edificio de referencia**

Esta actividad consiste en la modificación de algunos de los datos del modelo virtual del edificio a evaluar según recomendaciones del Apéndice G de la ASHRAE 90.1. Dichos cambios se enfocan en cuatro áreas: materiales y elementos constructivos, potencia de iluminación, controles de iluminación, y régimen de ocupación. Otros datos tales como potencias de equipos que se pueden conectar no sufren ninguna modificación. La Figura 32 presenta el procedimiento de esta actividad.

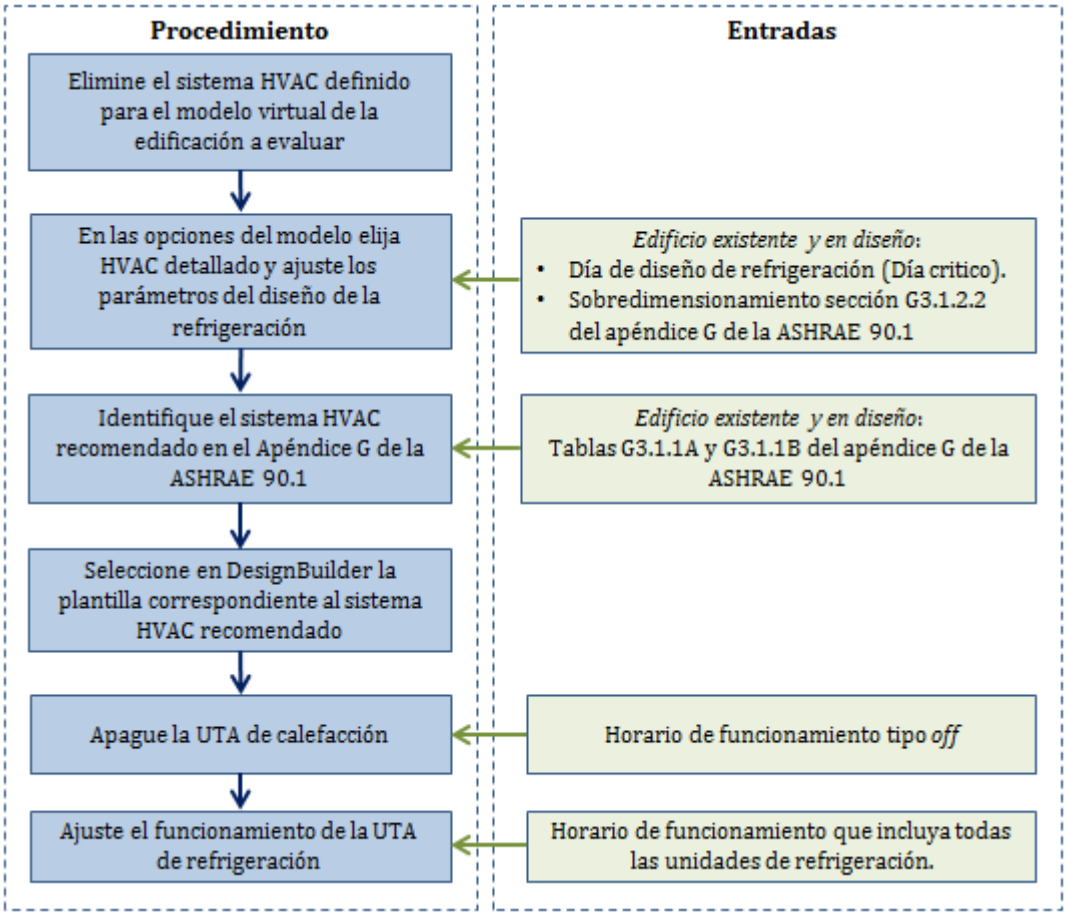
Figura 32. Procedimiento de la actividad de configuración de los datos del modelo virtual del edificio de referencia.



- **Actividad 3: Configuración del sistema HVAC del modelo virtual del edificio de referencia**

La configuración del sistema HVAC del modelo virtual del edificio de referencia presenta varios aspectos a considerar, motivo por el cual se planteó como una actividad individual de la Etapa 3. Dicha actividad está compuesta por dos pasos: selección del sistema HVAC y configuración del sistema HVAC en la herramienta de simulación. La Figura 33 presenta el procedimiento de esta actividad.

Figura 33. Procedimiento de la actividad de configuración del sistema HVAC del modelo virtual del edificio de referencia.

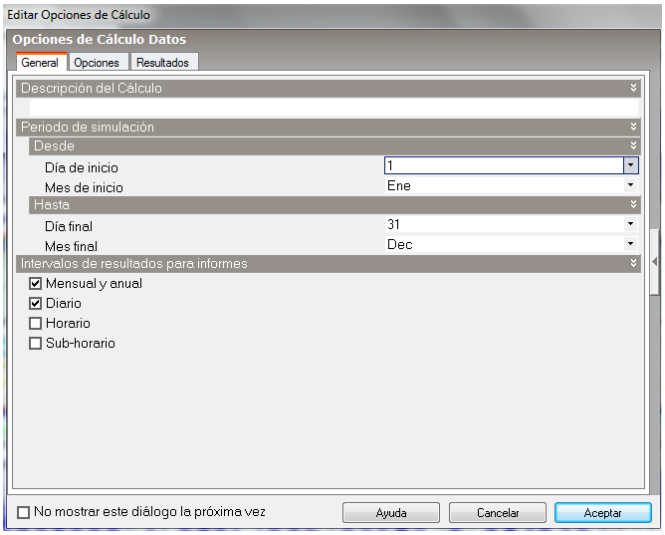


6.3. FASE 3: SIMULACIÓN ENERGÉTICA

Una vez se obtienen el modelo virtual de la edificación a evaluar y de su edificación de referencia se realizan las simulaciones energéticas. Esta fase especifica la configuración de las opciones de simulación para la obtención de resultados usados en el análisis y evaluación del desempeño energético. Se plantean tres etapas: configuraciones de simulación del modelo virtual, configuraciones de simulación del

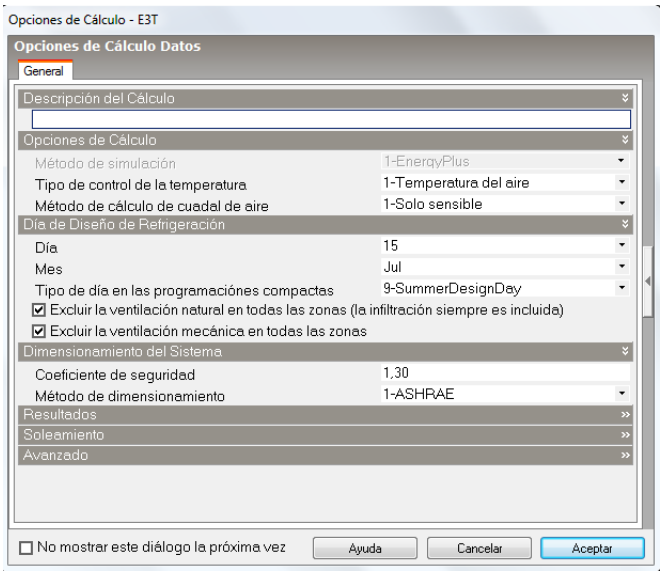
modelo virtual base y configuraciones de simulación de resultados especiales. La configuración de las opciones de simulación de la Etapa 1 y la Etapa 2 son realizadas en el cuadro de dialogo “Editar Opciones de Cálculo” mostrado en la Figura 34. Este cuadro se ejecuta al hacer clic en la pestaña de simulación de DesignBuilder.

Figura 34. Cuadro dialogo “Editar Opciones de Cálculo”.



La configuración de las opciones de simulación de la Etapa 3 se realiza en el cuadro de dialogo de “Opciones de Cálculo” mostrado en la Figura 35. Este cuadro es lanzado al hacer clic sobre la pestaña de “Diseño de iluminación”.

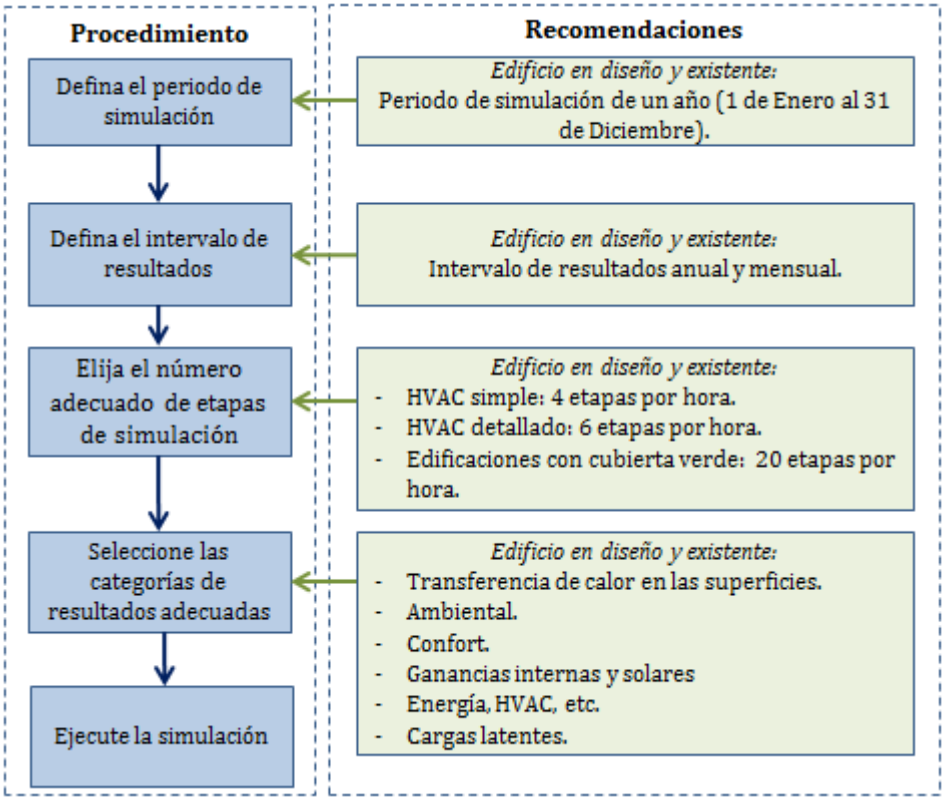
Figura 35. Cuadro de dialogo “Opciones de Cálculo”.



6.3.1. ETAPA 1: Configuración de simulación del modelo virtual

Esta etapa presenta la configuración de las simulaciones energéticas del modelo virtual que permiten obtener resultados como el consumo energético total anual, consumo energético anual de refrigeración, consumo energético anual de iluminación, temperatura interior anual promedio, humedad relativa anual promedio, indicadores del confort térmico y ganancias térmicas interiores. Dichos resultados son usados para el análisis del comportamiento energético y para la cuantificación de los indicadores de desempeño energético de la edificación evaluada. La Figura 36 presenta el procedimiento de esta etapa.

Figura 36. Procedimiento de la etapa de configuración de simulación del modelo virtual de la edificación evaluada.

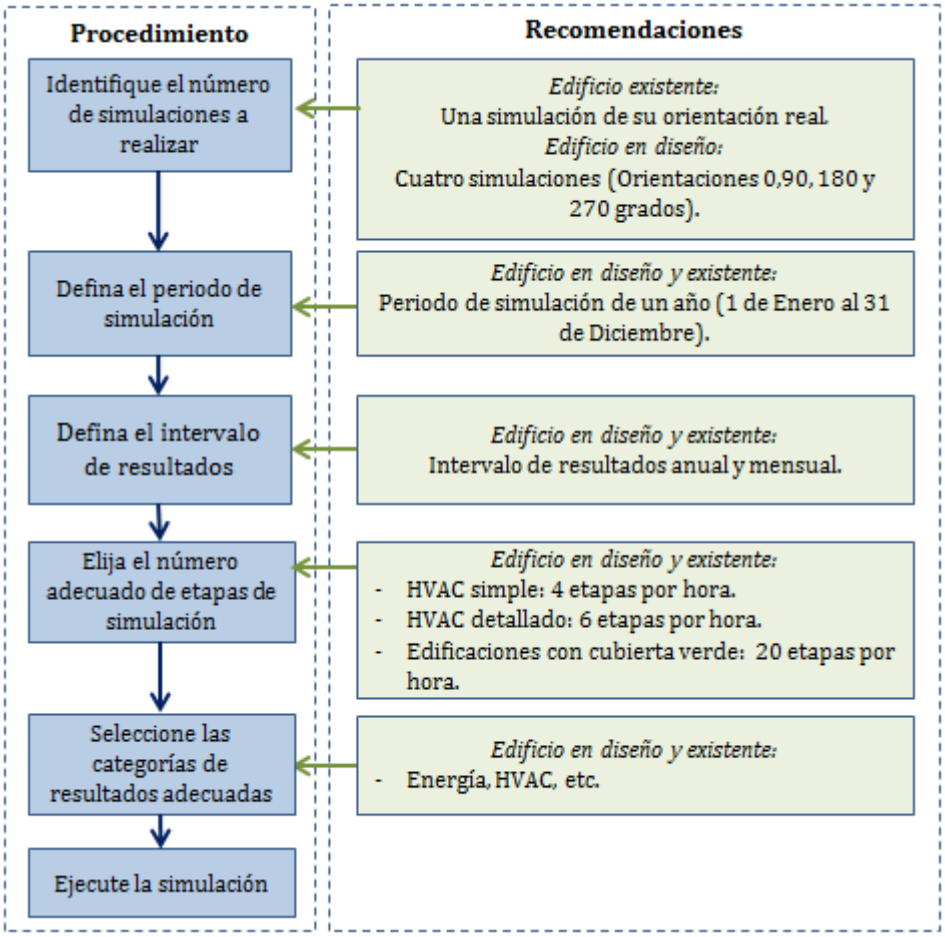


6.3.2. ETAPA 2: Configuración de simulación del modelo virtual del edificio de referencia

Esta etapa presenta la configuración de las simulaciones energéticas del modelo virtual del edificio de referencia que permiten obtener resultados como el consumo energético total anual, consumo energético anual de refrigeración y el consumo energético anual de iluminación.

Los resultados mencionados anteriormente son usados en la cuantificación de los indicadores de desempeño energético del edificio de referencia requeridos en la evaluación comparativa del desempeño energético. La Figura 37 presenta el procedimiento de esta etapa.

Figura 37. Procedimiento de la etapa de configuraciones de simulación del modelo virtual del edificio de referencia.

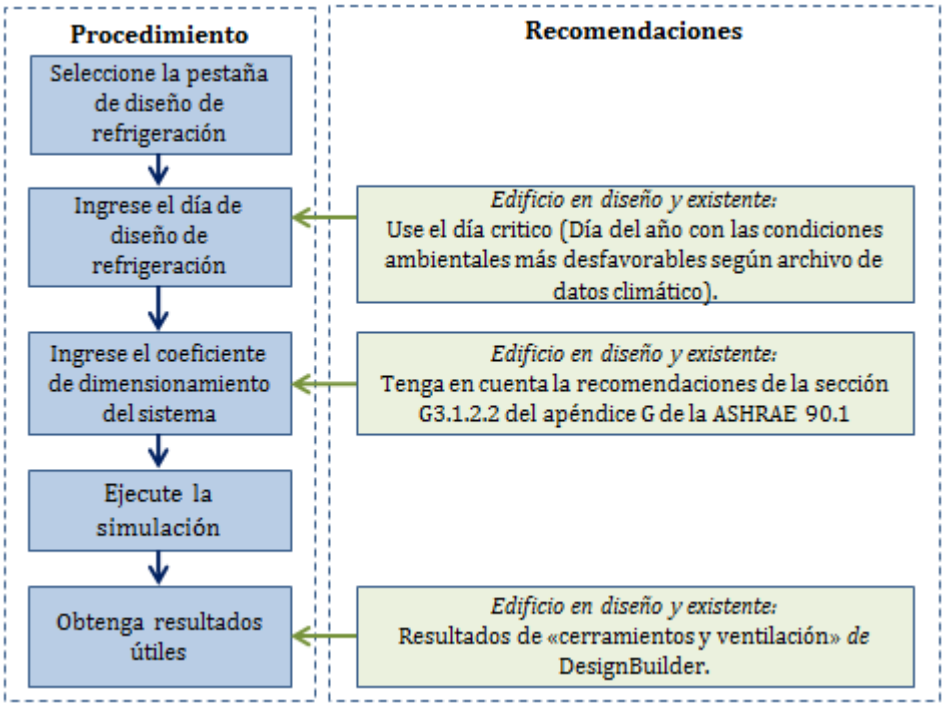


6.3.3. ETAPA 3: Configuraciones de simulación especiales

Esta etapa presenta la configuración de las simulaciones energéticas del modelo virtual que permiten obtener como resultado el balance térmico de los diferentes elementos que hacen parte de la envolvente del edificio tales como muros exteriores, pisos interiores y cubiertas, entre otros.

Los resultados mencionados son usados en el análisis energético de la edificación evaluada para la identificación de los elementos de la envolvente que contribuyen al calentamiento de los espacios interiores. La Figura 38 presenta el procedimiento de esta etapa.

Figura 38. Procedimiento de la etapa de configuraciones de simulación especiales.



6.4. FASE 4: EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO ENERGÉTICO

En esta fase se realiza el análisis y evaluación del desempeño energético de la edificación. Tres etapas componen la Fase 4: análisis del comportamiento energético, evaluación del desempeño energético y generación de recomendaciones de mejora. Esta fase se fundamenta en los análisis y evaluación del desempeño energético realizados en el Capítulo 5 de este documento.

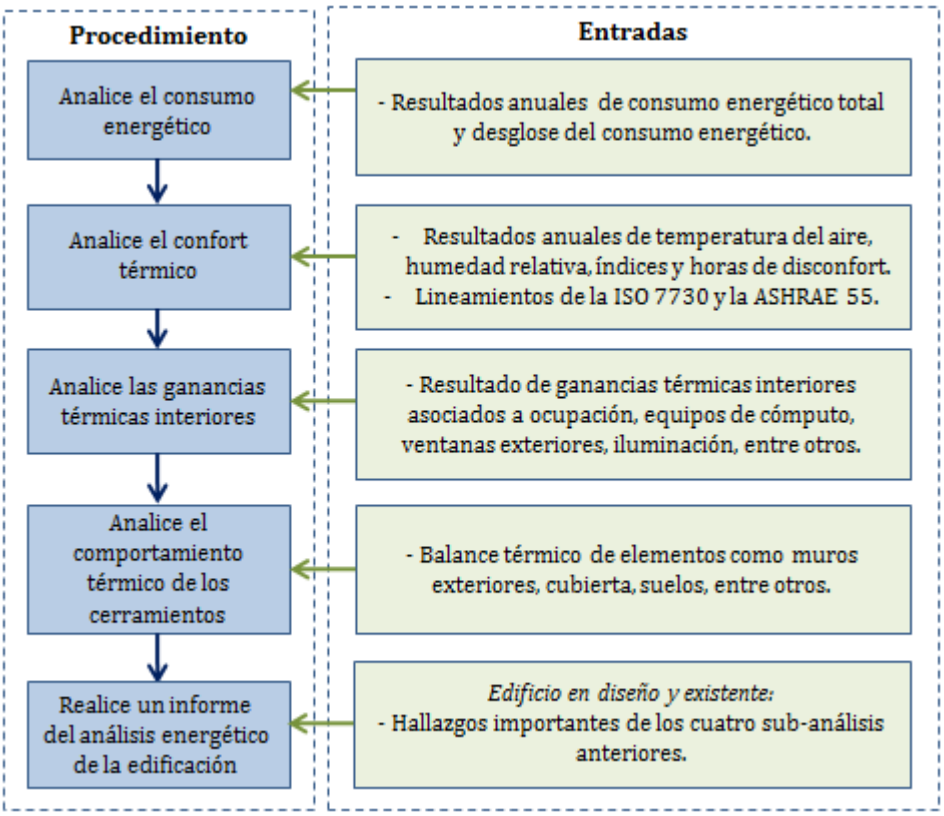
6.4.1. ETAPA 1: Análisis energético del edificio

Esta etapa propone el análisis de algunos resultados de simulación relacionados con aspectos como la eficiencia energética de los sistemas de la edificación, cargas térmicas interiores, confort y comportamiento térmico de la envolvente, con el objetivo

de estudiar su influencia sobre el desempeño energético. Éstos son extraídos del modelo virtual del edificio a evaluar.

Se proponen cuatro actividades: análisis del consumo energético, análisis del confort térmico, análisis de las ganancias térmicas interiores y análisis del comportamiento térmico de los cerramientos. El procedimiento de esta etapa es mostrado en la Figura 39.

Figura 39. Procedimiento de la etapa de análisis energético del edificio.



- **ACTIVIDAD 1: Análisis del consumo energético**

En esta actividad se tienen en cuenta resultados como el consumo energético anual total, el consumo energético anual en refrigeración y el consumo energético anual en iluminación. Éstos brindan indicaciones claras acerca del desempeño energético del edificio y sus sistemas más importantes. A partir de su análisis se podrá identificar el sector de mayor consumo energético en el edificio.

- **ACTIVIDAD 2: Análisis del confort térmico**

Esta actividad considera resultados de simulación como temperatura anual promedio del aire, humedad relativa anual promedio, índices de confort térmico, horas de disconfort térmico. Éstos permiten evaluar los niveles de confort al interior de los espacios de la edificación. Pueden ser asociados con resultados de ganancias térmicas interiores y balance térmico por cerramientos para la identificación de aspectos que influyen negativamente en el desempeño energético. Para su evaluación se recomienda tener en cuenta las disposiciones de la ISO 7730 y la ASHRAE 55.

- **ACTIVIDAD 3: Análisis de ganancias térmicas interiores**

En esta actividad se analizan resultados de ganancias térmicas asociadas a ocupación, equipos de cómputo, ventanas exteriores, iluminación artificial entre otras. Éstos permiten identificar las principales fuentes de calentamiento de los espacios interiores de la edificación que pueden ser determinantes de situaciones de disconfort térmico y altos consumos energéticos en el área de refrigeración.

- **ACTIVIDAD 4: Análisis del comportamiento térmico de los cerramientos**

Esta actividad consiste en el análisis de resultados como ganancias térmicas en muros exteriores, cubiertas, suelos entre otros. Éstos permiten evaluar el comportamiento térmico de diferentes componentes de la envolvente de la edificación, así como la identificación de puntos débiles que afecten el desempeño energético del edificio, sus sistemas, y el confort térmico de sus ocupantes.

6.4.2. ETAPA 2: Evaluación del desempeño energético

Esta etapa tiene como objetivo el establecimiento del desempeño energético de la edificación objeto de estudio. Tres actividades componen esta etapa: cuantificación de indicadores de desempeño energético, evaluación comparativa del desempeño energético usando límites fijos y, evaluación comparativa del desempeño energético usando límites personalizados. Los principales insumos de esta etapa son los resultados anuales del consumo energético total, consumo energético de refrigeración, consumo energético de iluminación y emisiones anuales de CO_2.

- **ACTIVIDAD 1: Cuantificación de indicadores**

Los indicadores a cuantificar son cuatro: indicador global de desempeño energético (IGDE), indicador de desempeño energético en refrigeración (IDER), indicador de desempeño energético en iluminación (IDEI) y el indicador de emisiones de gases de CO_2 (IEG). Éstos deben ser calculados para los modelos virtuales de la edificación evaluada y su respectivo edificio de referencia. Para el cálculo de los indicadores se debe tener en cuenta la información de la Tabla 32.

Tabla 32. Indicadores para la evaluación del desempeño energético.

Indicador	Entradas	Ecuación
Indicador global de desempeño energético (IGDE)	Consumo energético anual total (CEAT) Área total ocupada del edificio (A_{Edif}).	$\frac{CEAT}{A_{Edif}} \left[\frac{kW}{m^2}\right]$
Indicador de desempeño energético en refrigeración (IDER)	Consumo energético anual en refrigeración (CEAR). Área total ocupada del edificio (A_{Edif}).	$\frac{CEAR}{A_{Edif}} \left[\frac{kW}{m^2}\right]$
Indicador de desempeño energético en iluminación (IDEI)	Consumo energético anual en iluminación (CEAI). Área total ocupada del edificio (A_{Edif}).	$\frac{CEAI}{A_{Edif}} \left[\frac{kW}{m^2}\right]$
Indicador de emisiones de gases de CO_2 (IEG)	Emisiones anuales de CO_2 (EA). Área total ocupada del edificio (A_{Edif}).	$\frac{EA}{A_{Edif}} \left[\frac{kg}{m^2}\right]$

- **ACTIVIDAD 2: Evaluación comparativa del desempeño energético usando límites fijos**

Esta actividad consiste en la obtención del porcentaje de ahorro energético que representa la edificación evaluada a través de la comparación del valor del IDGE del modelo virtual con la línea base de la Resolución 0549 de 2015 mostrada en la Tabla 26 del Capítulo 5. Su aplicación podrá realizarse siempre y cuando la edificación evaluada cumpla con los requisitos de área y ocupación expuestos en la sección de definiciones de dicha resolución.

- **ACTIVIDAD 3: Evaluación comparativa del desempeño energético usando límites personalizados**

Esta actividad busca el establecimiento del desempeño energético de la edificación evaluada a través de la comparación de los indicadores del modelo virtual del edificio evaluado con los del modelo virtual del edificio de referencia. Inicialmente, se propone estimar el porcentaje de ahorro (diferencia porcentual) para cada pareja de indicadores teniendo en cuenta la siguiente ecuación.

$$\%\ Ahorro = \left(1 - \frac{Valor\ Indicador}{Valor\ Indicador\ Base}\right) * 100\ \%$$

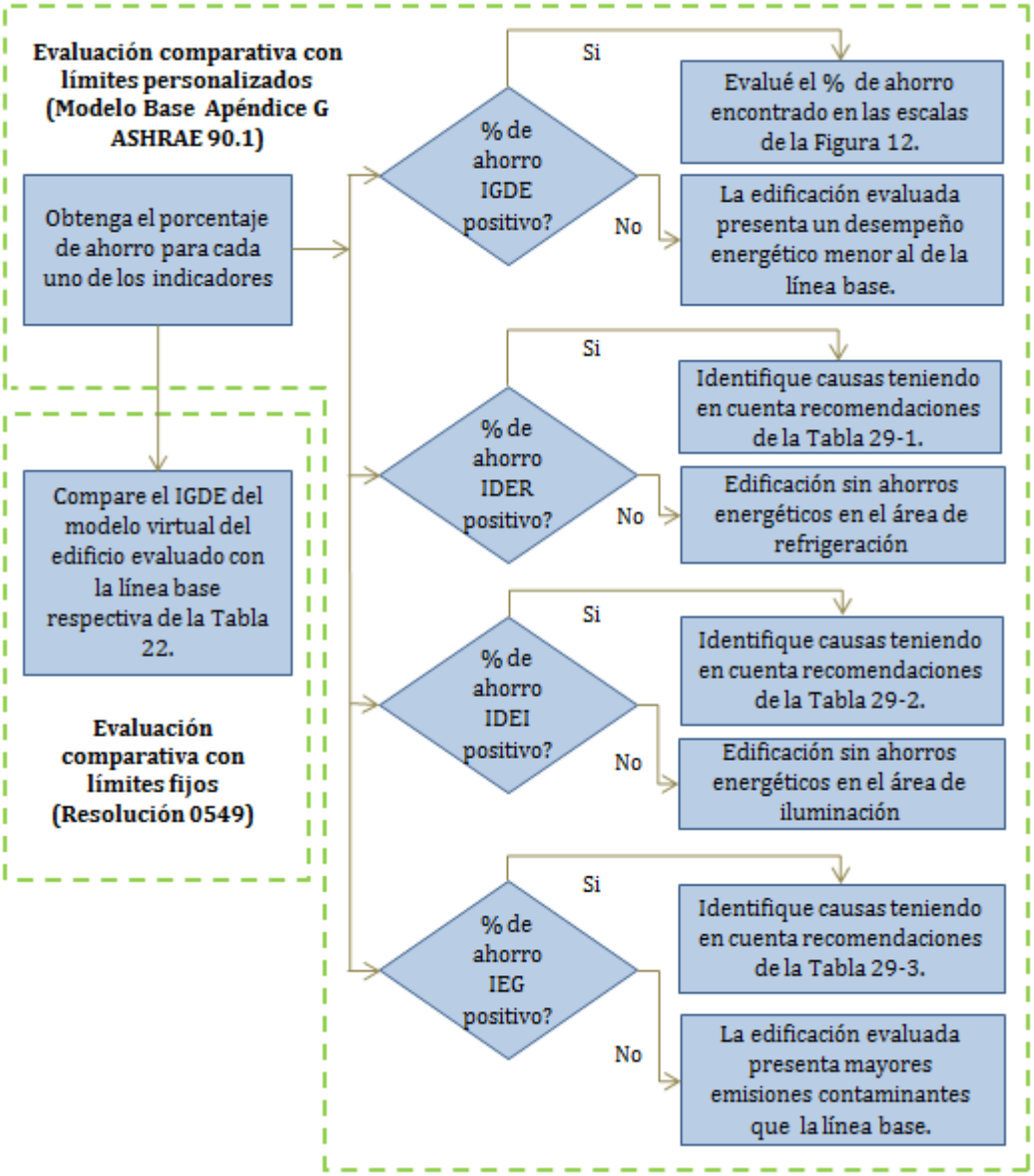
Luego, si el porcentaje de ahorro es positivo, se emplea el valor del IDGE para valorar el desempeño energético del edificio respecto a las escalas del LEED, BREAM y CALENER mostradas en la Figura 12 de este documento. Para los demás indicadores (IDER, IDEI, e IEG) se establecen algunas recomendaciones a fin de explicar los ahorros energéticos logrados en las áreas de refrigeración e iluminación, así como la reducción en las emisiones de CO_2. Estas recomendaciones son mostradas en la Tabla 33.

Tabla 33. Recomendaciones a tener en cuenta en el análisis del ahorro energético de refrigeración e iluminación, así como en la reducción de emisiones de gases contaminantes.

Área	Recomendaciones
1. Ahorro energético en refrigeración	- Compare la eficiencia de los componentes del sistema de refrigeración en los modelos virtuales del edificio evaluado y su edificio base. - Verifique el número de espacios climatizados del edificio evaluado en relación con el edificio base. - Identifique las principales fuentes de calentamiento y enfriamiento de los espacios del edifico revisando los resultados de las ganancias interiores.
2. Ahorro energético en iluminación	- Compare las potencias de iluminación asignadas a los modelos virtuales del edificio evaluado y el edificio base. - Verifique la existencia de controles de iluminación en el modelo virtual del edificio a evaluar. - Compare los tipos de lámpara asignados a los modelos virtuales del edificio evaluado y el edificio base.
3. Reducción de emisiones de CO_2	- Compare el consumo energético de los modelos virtuales del edificio a evaluar y el edificio base.

La Figura 40 muestra el resumen de los procedimientos de la Etapa 2 de evaluación del desempeño energético.

Figura 40. Resumen procedimientos etapa de evaluación del desempeño energético.



6.4.3. ETAPA 3: Generación de recomendaciones de mejora

Esta actividad busca identificar estrategias que permitan mejorar los resultados del desempeño energético del edificio evaluado en las áreas analizadas en la Etapa 1 de esta fase (consumo energético del edificio, ganancias térmicas interiores, confort térmico y comportamiento térmico de los cerramientos).

La Tabla 34 presenta un grupo de estrategias para el mejoramiento del desempeño energético del edificio en torno a 5 objetivos relacionados con la reducción de ganancias térmicas interiores, reducción de ganancias térmicas a través de la envolvente del edificio, reducción del consumo energético del sistema de climatización, reducción de ganancias térmicas del sistema de iluminación y reducción de ganancias térmicas del sistema de agua caliente.

Tabla 34. Estrategias para el mejoramiento del desempeño energético de la edificación evaluada.

Objetivo	Estrategias generales	Estrategias detalladas
1. Reducir las ganancias térmicas interiores	Equipos y electrodomésticos: reduzca cargas de refrigeración y mejore condiciones de confort térmico	- Use equipos y electrodomésticos más eficientes. - Use controles para minimizar el uso y desperdicios. - Eduque a los ocupantes del edificio. - Aproveche la ventilación natural (si no existe sistema de climatización).
	Iluminación: reduzca cargas de iluminación y uso de energía	- Maximice los beneficios de la iluminación natural. - Use claraboyas para dirigir la luz a los espacios interiores. - Use sistemas de iluminación eléctricamente eficientes. - Use controles separados para iluminación en áreas cercanas a las ventanas. - Use controles automáticos para apagar las luces cuando no estén en uso.
	Ventanas exteriores: controle las ganancias solares a través de las ventanas para reducir la carga de refrigeración y situaciones de disconfort térmico	- Use una forma y orientación que beneficie el edificio. - Minimice las ventanas al este o al oeste, maximícelas al norte o al sur. - Use acristalamientos con bajos coeficientes de ganancias térmicas solares (SHGC). - Utilice elementos de sombreado sobre acristalamiento para reducir las ganancias térmicas solares y el deslumbramiento.
2. Reducir las ganancias térmicas a través de la envolvente del edificio	Reduzca las ganancias solares a través de superficies opacas del edificio a fin de reducir cargas de refrigeración y disconfort térmico	- Incremente el aislamiento de la cubierta con sistemas de cubierta verde. - Incremente la reflectancia y la emitancia de las superficies de la cubierta.

		- Sombree las superficies del edificio con árboles. - Emplee sistemas constructivos y materiales con alta inercia térmica.
3. Reducir el consumo energético del sistema de climatización	Reduzca las ganancias y pérdidas térmicas en los ductos del sistema de refrigeración	- Aísle los ductos. - No ubique ductos fuera del área acondicionada del edificio.
	Aproveche la ventilación natural	Para edificios con ventanas que pueden abrirse, diseñe la distribución del edificio para una eficaz ventilación natural cruzada.
	Selección equipos de refrigeración eficientes.	Tenga en cuenta las recomendaciones del Anexo 1 de la resolución 0549.
	Mejore el desempeño energético de los ventiladores del sistema de climatización	Diseñe un sistema eficiente de distribución para mejorar la potencia de los ventiladores
		Selle todas las juntas de los ductos para minimizar las pérdidas.
		Use motores de alta eficiencia.
	Use estrategias de control que reduzcan el uso de la energía.	- Divida el edificio en zonas térmicas. - Use programaciones diarias, consignas de temperatura, purga de pre-ocupación.
	Asegure una distribución adecuada del aire	Use procedimientos aceptados por la industria.
	Reduzca las ganancias térmicas interiores por equipos y electrodomésticos, iluminación, ventanas exteriores	Ver estrategias del Objetivo 1, apartados de equipos y electrodomésticos, iluminación, y ventanas exteriores.
	Reduzca ganancias por elementos de la envolvente	Ver estrategias del Objetivo 2.
4. Reducir el consumo energético del sistema de iluminación	Use iluminación interior más eficiente.	Ver estrategias del Objetivo 1, apartado de iluminación.
5. Reducir el consumo energético del sistema de agua caliente	Minimice las pérdidas de distribución	- Utilice unidades de punto de uso. - Minimice la distribución por ductos. - Aísle los ductos.

Este capítulo permitió el establecimiento de una herramienta metodológica para el análisis y evaluación del desempeño energético de edificaciones tropicales. En su

construcción se tuvieron en cuenta los hallazgos más importantes de los capítulos anteriores tales como la definición del escenario de uso (Capítulo 1), la HSE más apropiada para el análisis energético de edificaciones tropicales (Capítulo 2), los procedimientos de modelado y ajuste de los modelos virtuales (Capítulos 3 y 4), así como los procedimientos de simulación, análisis y evaluación del desempeño energético (Capítulo 5).

La herramienta metodológica propuesta presenta una estructura lógica y ordenada que indica al usuario los procedimientos a seguir para analizar y evaluar el desempeño energético de edificaciones tropicales. De esta manera, se reducen los requerimientos de conocimiento y experiencia del usuario en aspectos como el uso y configuración de la HSE, identificación de resultados de simulación pertinentes, métodos de evaluación y valores de referencia. Lo anterior, se traduce en una reducción del tiempo empleado por el usuario para realizar este tipo de análisis y en una mejora de la calidad de los resultados.

Tal como se plantea, esta herramienta metodológica puede ser usada para el análisis y evaluación del desempeño energético de edificaciones tropicales en proceso de diseño o existentes teniendo en cuenta las restricciones enunciadas en la Fase 1. Las edificaciones objeto de análisis pueden ser de diferentes tipos: educativa, comercial, salud, oficina y residenciales multifamiliares. La herramienta también puede ser aplicada para viviendas unifamiliares siguiendo la adaptación mostrada en la Figura 27.

7. CONCLUSIONES

Esta sección presenta las conclusiones más importantes del trabajo de investigación realizado. Estas se encuentran estructuradas en torno a cuatro áreas: proceso de diseño con enfoque energético, selección de la HSE, modelado virtual y ajuste de las edificaciones objeto de estudio, análisis energético, evaluación del desempeño energético, establecimiento de la herramienta metodológica y trabajos futuros.

La adaptación presentada del proceso de diseño con enfoque energético, construida a partir del proceso de diseño convencional de edificaciones desarrollado en Bucaramanga y recomendaciones de algunas de las guías de diseño integrado más representativas, permitió identificar que un proceso de diseño con enfoque energético aplicable al trópico presenta las mismas fases de un proceso de diseño convencional. Sin embargo, este enfoque requiere la definición temprana de objetivos de desempeño energético y ambiental, la inclusión al equipo de diseño de especialistas en diseño verde y eficiencia energética, y el uso de HSE como soporte para la toma de decisiones y la evaluación de los diseños.

A pesar de las limitaciones que representa el uso del proceso de diseño típico de edificaciones de Bucaramanga como insumo de la adaptación presentada del proceso de diseño con enfoque energético, se considera que dicha adaptación puede ser representativa de la zona tropical dada la importancia de las empresas consideradas y del sector de la construcción de Bucaramanga.

Según la revisión de literatura realizada, las edificaciones tropicales deben incluir en su diseño estrategias que mitiguen el exceso de ganancias solares y permitan el aprovechamiento de la ventilación y la luz natural. De esta manera se generaran reducciones en el consumo energético de los sistemas más importantes de la edificación.

De acuerdo con el análisis de una muestra representativa de artículos científicos, las herramientas de simulación energética más usadas en entornos tropicales son EnergyPlus, DesignBuilder, Ecotect e eQUEST. Sin embargo, una evaluación de las

capacidades de cada herramienta reveló que DesignBuilder presenta mejor desempeño en características como usabilidad, soporte para la toma de decisiones, interoperabilidad y pertinencia en el diseño de edificaciones en el trópico. Debido a esto, esta herramienta es actualmente la más pertinente para ser usada en el análisis y evaluación del desempeño energético de edificaciones tropicales.

La evaluación del ajuste de los modelos virtuales de las edificaciones objeto de estudio permitió encontrar que la calidad del proceso de modelado virtual y asignación de datos incide directamente sobre la exactitud de los resultados de las simulaciones, por lo que el usuario de la HSE deberá soportar sus simplificaciones en su propia experticia o en recomendaciones de tutoriales u otros usuarios.

La corrección de las entradas de un modelo virtual de una edificación existente a través de datos recopilados en visitas de inspección mejora aproximadamente un 25% la exactitud de los resultados con respecto a una corrección con información “As-Built”.

Los resultados de las simulaciones energéticas muestran que el Edificio de Ingeniería Eléctrica presenta una alta inercia térmica debido a la composición de sus muros exteriores. Este comportamiento sumado al efecto aislante de la cubierta verde y la ventilación natural hace que un 80% de los espacios interiores del edificio presenten condiciones de confort térmico que oscilan entre confortable y ligeramente caluroso.

La principal fuente de calentamiento del Edificio de Ingeniería Eléctrica, el Edificio de Ingeniería Industrial y la Vivienda de Interés Social son las ganancias térmicas por acristalamientos exteriores. Estas tienen una representación en el total de ganancias térmicas del 68%, 52% y 58% respectivamente.

Teniendo en cuenta los resultados de emisiones de CO_2, El edificio de Ingeniería Industrial produce cinco veces más emisiones que el Edificio de Ingeniería Eléctrica.

De acuerdo con los hallazgos de la evaluación del desempeño energético, el Edificio de Ingeniería Eléctrica representa un ahorro energético del 77,2 % con respecto a su edificio de referencia, debido al efecto de ventilación natural, iluminación natural por

ventanales y tubos solares, y cubierta verde. Para el caso del Edificio de Ingeniería Industrial el ahorro energético fue del 53 %. Este es debido al uso de sistemas eficientes de refrigeración y a la reducción de la potencia de iluminación.

De las escalas consideradas para la evaluación del desempeño energético solo CALENER permite obtener una diferenciación clara del desempeño energético de los edificios considerados, esto es debido a que esta escala solo establece tres niveles de desempeño bien diferenciados.

Teniendo en cuenta los hallazgos de una revisión bibliográfica y considerando restricciones como la ausencia de códigos energéticos y bases de datos de referencia se seleccionó como método de evaluación del desempeño energético la evaluación comparativa mediante indicadores. A partir de éste método no solo se evaluó la edificación de forma global sino también de forma jerárquica (sistemas más importantes de la edificación). En total se tuvieron en cuenta cuatro indicadores: indicador global del desempeño energético (IGDE), indicador de desempeño energético en refrigeración (IDER), indicador de desempeño energético en iluminación (IDEI) e indicador de emisiones de gases de CO_2 (IEG), su selección se realizó teniendo en cuenta hallazgos de artículos científicos y las restricciones propias de la HSE usada.

Es común encontrar en la literatura el uso del modelo base del Apéndice G de la ASHRAE 90.1 como valor de referencia personalizado para la evaluación comparativa del desempeño energético de edificaciones. Sin embargo, se encontró que este referente no es del todo adecuado para el análisis de edificaciones tropicales debido a factores propios de la arquitectura tropical que no permiten contar con edificaciones totalmente estancas.

Actualmente, en Colombia la Resolución 0549 de 2015 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio es la única normativa que soporta la evaluación comparativa del desempeño energético de edificaciones. Esta proporciona una línea base de consumo energético útil en la determinación del ahorro energético que representa la edificación.

La herramienta metodológica propuesta presenta una estructura lógica y ordenada que indica al usuario los procedimientos a seguir para analizar y evaluar el desempeño energético de edificaciones tropicales. De esta manera, se reducen los requerimientos de conocimiento y experiencia del usuario en aspectos como el uso y configuración de la HSE, identificación de resultados de simulación pertinentes, métodos de evaluación y valores de referencia. Lo anterior, se traduce en una reducción del tiempo empleado por el usuario para realizar este tipo de análisis y en una mejora de la calidad de los resultados.

A través de la realización de este trabajo de investigación fue posible adquirir un nivel avanzado de experticia en el manejo de DesignBuilder. De igual forma, se adquirieron conocimientos que facilitan el uso de las HSE dentro de un proceso de diseño que busque mejorar las calidades ambientales y energéticas de las edificaciones.

Teniendo en cuenta la cantidad de posibles usos de una HSE en el proceso de diseño con enfoque energético, es conveniente el desarrollo de investigaciones similares que permitan reducir los requerimientos de experiencia y conocimiento de los usuarios en diversos tópicos de análisis.

Se requiere adelantar un trabajo de investigación que evalué los diferentes métodos de calibración de modelos virtuales, teniendo en cuenta un proceso de medición intensivo, con el objetivo de determinar el proceso más pertinente para ser usado en el ajuste de modelos virtuales de edificaciones tropicales.

De acuerdo con los resultados de los análisis de evaluación del desempeño energético del capítulo 5, se requiere establecer un referente de comparación adecuado para la evaluación energética de edificaciones tropicales, ya que el usado (Método de auto-referencia del Apéndice G de la ASHRAE 90.1) está diseñado para edificaciones estancas.

Para verificar la efectividad de la herramienta metodológica propuesta debe plantearse un estudio de validación que tenga en cuenta todos los tipos de edificaciones para las cuales la herramienta es aplicable según el alcance definido para la misma.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] I. Oropeza-perez and P. Alberg, “Energy saving potential of utilizing natural ventilation under warm conditions – A case study of Mexico,” *Appl. Energy*, vol. 130, pp. 20–32, 2014.

[2] A. Bastide, P. Lauret, and H. Boyer, “Building energy efficiency and thermal comfort in tropical climates Presentation of a numerical approach for predicting the percentage of well-ventilated living spaces in buildings using natural ventilation,” *Energy Build.*, vol. 38, pp. 1093–1103, 2006.

[3] Q. J. Kwong, N. M. Adam, and B. B. Sahari, “Thermal comfort assessment and potential for energy efficiency enhancement in modern tropical buildings: A review,” *Energy Build.*, vol. 68, pp. 547–557, Jan. 2014.

[4] E. Prianto and P. Depecker, “Optimization of architectural design elements in tropical humid region with thermal comfort approach,” *Energy Build.*, vol. 35, pp. 273–280, 2003.

[5] F. H. Mallick, “Therman comfort and building design in the tropical climates,” *Energy Build.*, vol. 23, pp. 161–167, 1996.

[6] A. Okeil, “A holistic approach to energy efficient building forms,” *Energy Build.*, vol. 42, no. 9, pp. 1437–1444, Sep. 2010.

[7] C. J. Hopfe, “Uncertainty and sensitivity analysis in building performance simulation for decision support and design optimization,” Ph.D. thesis, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, 2009.

[8] H. Kim, A. Stumpf, and W. Kim, “Analysis of an energy efficient building design through data mining approach,” *Autom. Constr.*, vol. 20, no. 1, pp. 37–43, Jan. 2011.

[9] T. Ramesh, R. Prakash, and K. K. Shukla, “Life cycle approach in evaluating energy performance of residential buildings in Indian context,” *Energy Build.*, vol. 54, pp. 259–265, Nov. 2012.

[10] H. S. Rallapalli, “A comparison of EnergyPlus and eQUEST: Whole Building Energy Simulation Results for a Medium Sized Office Building,”MSc thesis, Arizona State University, Tempe, 2010.

[11] E. Hirata and S. Ricciarini, “Perspectiva Holística de la Eficiencia Energética en Edificaciones - Los Códigos Internacionales,” in *Seminario Internacional - Eficiencia energética e Edificaciones*, Bogotá, Colombia, 2011. [Online]. Available: www.upme.gov.co/Docs/Seminarios/2011/EEE/7%20EVANGELINA%20HIRATA.pdf

[12] USAID, “DOCUMENTO TÉCNICO DE SOPORTE - RECOMENDACIONES DE POLÍTICA PÚBLICA DE CONSTRUCCIÓN Y URBANISMO SOSTENIBLE INFORME FINAL,” Bogotá, 2013.[Online]. Available: *www.sdp.gov.co/.../Politica_Publica_Ecourbanismo/DTS_PPECS_V5_140526_1.pdf*

[13] MAyDS Colombia, “Criterios ambientales para el diseño y construcción de vivienda urbana.” Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Bogotá, 2012. [Online]. Available: http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/Sello_ambiental_colombiano/cartilla_criterios_amb_diseno_construc.pdf

[14] Unidad de Planeación Minero Energética UPME, “Balance energético Colombiano BECO 1975 -2015” [Online]. Available: http://www1.upme.gov.co/balance-energetico-colombiano-1975-2015

[15] UPME, “Proyección de Demanda de Energía en Colombia,” 2010. [Online]. Available: http://www.upme.gov.co/Docs/Energia/PROYECC_DEMANDA_ENERGIA_OCTUBRE_2010.pdf

[16] L. Pérez-Lombard, J. Ortiz, and C. Pout, “A review on buildings energy consumption information,” *Energy Build.*, Volume 40, Issue 3, 2008, Pages 394–398.

[17] G. Mustafaraj, D. Marini, A. Costa, and M. Keane, “Model calibration for building energy efficiency simulation,” *Appl. Energy*, vol. 130, pp. 72–85, Oct. 2014.

[18] T. Hemsath, “CONCEPTUAL ENERGY MODELING ARCHITECTURE, PLANNING AND DESIGN: IMPACT OF USING PERFORMANCE SIMULATION IN EARLY DESIGN STAGES,” in *13th Conference of international Building Simulation Association*, Chambéry, France, 2013.

[19] M. Pollock, Y. Roderick, D. Mcewan, and C. Wheatley, “Building simulation as an assisting tool in designing an energy efficient building : a case study.” in Eleventh Conference of international Building Simulation Association, Glasgow, Scotland, 2009.

[20] S. Attia, “State of the Art of Existing Early Design Simulation Tools for Net Zero Energy Buildings : A Comparison of Ten Tools”, Catholic University of Louvain , Tech. Rep , 2011. [Online]. Available: http://www-climat.arch.ucl.ac.be/s_attia/attia_nzeb_tools_report.pdf

[21] D. Markovic, D. Cvetkovic, and B. Masic, “Survey of software tools for energy efficiency in a community,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 9, pp. 4897–4903, Dec. 2011.

[22] C. M. Hui, “BUILDING ENERGY SIMULATION METHODS,” in *Energy Performance of Air-conditioned Buildings in Hong Kong*, PhD thesis, City University of Hong Kong. 1996, pp. 168–223. [Online]. Available: https://web.hku.hk/~cmhui/thesis/toc.htm

[23] M. M. Mourshed, D. Kelliher, and M. Keane, “Integrating Building Energy Simulation in the design process ,” *IBPSA*, vol. 13, pp. 21–26, 2003.

[24] C. Morbitzer, P. Strachan, J. Webster, B. Spires, and D. Cafferty, “INTEGRATION OF BUILDING SIMULATION INTO THE DESIGN PROCESS OF AN ARCHITECTURE,” in Seventh International IBPSA Conference, Rio de Janeiro, Brazil, 2001.

[25] M. K. Dixit, J. L. Fernández-Solís, S. Lavy, and C. H. Culp, “Identification of

parameters for embodied energy measurement: A literature review," *Energy Build.*, vol. 42, no. 8, pp. 1238–1247, Aug. 2010.

[26] T. Hong, S. K. Chou, and T. Y. Bong, "Building simulation : an overview of developments and information sources," Build. and Env., vol. 35, pp. 347–361, 2000.

[27] D. B. Crawley, J. W. Hand, M. Kummert, and B. T. Griffith, "Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs," *Build. Environ.*, vol. 43, no. 4, pp. 661–673, Apr. 2008.

[28] N. Jamaludin, M. F. Khamidi, S. N. Abdul Wahab, and M. M. a. Klufallah, "Indoor Thermal Environment in Tropical Climate Residential Building," *E3S Web Conf.*, vol. 3, Bangi, Malaysia, 2014.

[29] United Nations Human Settlements Programe, *SUSTAINABLE BUILDING DESIGN FOR TROPICAL CLIMATES:Principles and Applications for Eastern Africa*. 2014 . [Online]. Available: http://unhabitat.org/books/sustainable-building-design-for-tropical-climates/

[30] International Energy Agency, "Integrated Design Process Guideline," 2003. [Online]. Available: http://archive.iea-shc.org/task23/publications/IDPGuide_internal.pdf

[31] H. Ring and M.-A. Knudstrup, "The integrated Design Process (IDP) - A more holistic approach to sustainable architecture.," in The 2005 World Sustainable Building Conference, Tokio, Japon, 2005.

[32] The American Institute of Architects, "*Integrated Project Delivery : A Guide"*, 2007. [Online]. Available:http://info.aia.org/siteobjects/files/ipd_guide_2007.pdf

[33] ASHRAE, The American Institute of Architects, Illuminating Engineering Society of North America, U. S. G. B. Council, and U.S. Departament of Energy, *Advanced Energy Design Guide for Grocery Stores*. Atlanta, 2015.

[34] ASHRAE, The American Institute of Architects, Illuminating Engineering Society of North America, U.S Green Building Council, and U.S. Departament of Energy, *Advanced Energy Design Guide for Highway Lodging*. Atlanta, 2009.

[35] ASHRAE, The American Institute of Architects, Illuminating Engineering Society of North America, U.S Green Building Council, and U.S. Departament of Energy, "Advanced Energy Design Guide for Large Hospitals." Atlanta, 2012.

[36] ASHRAE, The American Institute of Architects, Illuminating Engineering Society of North America, U.S Green Building Council, and U.S. Departament of Energy, *Advanced Energy Design Guide for Medium to Big Box Retail Buildings*. Atlanta, 2011.

[37] ASHRAE, The American Institute of Architects, Illuminating Engineering Society of North America, U.S. Departament of Energy, and U.S. Green Building Council, "Advanced Energy Design Guide for Small to Medium Office Buildings." Atlanta, 2011.

[38] ASHRAE, The American Institute of Architects, Illuminating Engineering Society of North America, U.S Green Building Council, and U.S. Departament of Energy,

Advanced Energy Design Guide for K-12 School Buildings. Atlanta, 2011.

[39] ASHRAE, The American Institute of Architects, Illuminating Engineering Society of North America, U.S. Green Building Council, and U.S. Departament of Energy, *Advanced Energy Design Guide for Small Warehouses and Self-Storage Buildings*. Atlanta, 2008.

[40] D. Kolokotsa, C. Diakaki, E. Grigoroudis, G. Stavrakakis, and K. Kalaitzakis, "Decision support methodologies on the energy efficiency and energy management in buildings," *Adv. Build. Energy Res.*, vol. 3, no. 1, pp. 121–146, Jan. 2009.

[41] C. Koch and H. Buhl, "' Integrated Design Process ' a Concept for Green Energy Engineering," *Engineering*, Vol. 5 No. 3, 2013, pp. 292-298.

[42] M. Trebilcock, "Proceso de Diseño Integrado: nuevos paradigmas en arquitectura sustentable," *Arquitetura Rev.*, vol. 5, no. 2, pp. 65–75, Nov. 2009.

[43] BC GREEN BUILDING ROUNDTABLE, "ROADMAP FOR THE INTEGRATED DESIGN PROCESS," 2007. [Online]. Available: http://www.greenspacencr.org/events/IDProadmap.pdf

[44] T. Häkkinen, "Sustainability and performance assessment and benchmarking of buildings," Tech. Rep, 2012. [Online]. Available: http://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2012/T72.pdf

[45] P. de Wilde, "*Computational Support for the Selection of Energy Saving Building Components"*, PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 2004.

[46] T. L. Hemsath, "CONCEPTUAL ENERGY MODELING FOR ARCHITECTURE , PLANNING AND DESIGN : IMPACT OF USING BUILDING PERFORMANCE SIMULATION", in 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France, 2013.

[47] M. M. Q. Carvalho, E. L. La Rovere, and A. C. M. Gonc, "Analysis of variables that influence electric energy consumption in commercial buildings in Brazil," Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 14, pp. 3199–3205, 2010.

[48] The American Institute of Architects, "An Architect's Guide to Integrating Energy Modeling in the design process", 2012. [Online]. Available: http://aiad8.prod.acquia-sites.com/sites/default/files/2016-04/Energy-Modeling-Design-Process-Guide.pdf

[49] S. Wang, C. Yan, and F. Xiao, "Quantitative energy performance assessment methods for existing buildings," *Energy Build.*, vol. 55, pp. 873–888, Dec. 2012.

[50] S. K. El Sherif, "The Impact of Overhangs and Side-fins on Building Thermal Comfort , Visual Comfort and Energy Consumption in the Tropics," MSc Thesis, The Brithish University in Dubai, 2012. [Online]. Available: http://bspace.buid.ac.ae/handle/1234/139

[51] P. S. Jahnkassim, "ENERGY STRATEGIES IN THE TROPICAL CONTEXT – THE USE OF SIMULATION TOOLS IN INFORMING URBAN BIOCLIMATIC

DESIGN IN A MALAYSIAN HIGHRISE DEVELOPMENT," in The 2005 Word Sustainable Building Conference, Tokio, Japon, 2005.

[52] K. T. Chan and W. K. Chow, "Energy impact of commercial-building envelopes in the sub-tropical climate," *Appl. Energy*, vol. 60, 1998.

[53] M. E. Sosa and G. Siem, "*MANUAL DE DISEÑO PARA EDIFICACIONES ENERGÉTICAMENTE EFICIENTES EN EL TRÓPICO"*, IDEC, Primera Edición, Caracas, Venezuela, 2004. [Online]. Available: https://www.fau.ucv.ve/idec/racionalidad/pdf/manual_energia.pdf

[54] Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio,"*Anexo No. 1 de la Resolución 0549: Guía de construcción sostenible para el ahorro de agua y energía en edificaciones"*. Bogotá, Colombia, 2015. [Online]. Available: http://camacol.co/sites/default/files/IT-Reglamentos/ANEXO%201%20Guia%20de%20construccion%20sostenible%20-%20JULIO%208%202015.pdf

[55] WWF España and Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino, "*Guía de ahorro y eficiencia energética en oficinas"*, Madrid, 2008. [Online]. Available: http://www.officinaseficientes.es/docs/guia_OFF.pdf

[56] S. Attia and L. La Neuve, "Building Performance Simulation Tools : Selection Criteria and User Survey", Catholic University of Louvain, Tech. Rep, 2010. [Online]. Available: http://www-climat.arch.ucl.ac.be/s_attia/Attia_BPSTools_SelectionCriteriaUserSurvey_Rreport.pdf

[57] L. Weytjens, S. Attia, G. Verbeeck, and A. De Herde, "A comparative study of the ' architect - friendliness ' of six building performance simulation tools", International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development, Vol. 2, no. 3, pp. 237-244, 2012.

[58] American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers - ASHRAE, "2009 Ashrae Handbook: Fundamentals," vol. 30329, no. 404. Atlanta, 2009.

[59] H. S. Rallapalli, "A comparison of EnergyPlus and eQUEST: Whole Building Energy Simulation Results for a Medium Sized Office Building,"MSc thesis, Arizona State University, Tempe, 2010.

[60] S. G. Attia, "EARLY DESIGN SIMULATION TOOLS FOR NET ZERO ENERGY BUILDINGS : A COMPARISON OF TEN TOOLS DESIGN PROCESS & TOOLS OF NZEB," in *12th* Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney, Australia, 2011.

[61] S. Attia, L. Beltrán, A. De Herde, and J. Hensen, "Architect Friendly: A Comparison of Ten Different Building Performance Simulation Tools," in the *Eleventh Conference of International Building Simulation Association*, Glasgow, Scotland, 2009.

[62] B. Lu, Fan; Lin, Borong; Peng, “Comparison of Simulation Tools for Optimization and Evaluation of Green Building Performance in China,” in *13th Conference of international Building Simulation Association*, Chambéry, France, 2013.

[63] A. Baba, L. Mahdjoubi, P. Olomolaiye, and C. Booth, “State-of-the-art on buildings performance energy simulations tools for architects to deliver low impact building (LIB) in the UK,” *Int. J. Dev. Sustain.*, vol. 2, no. 3, pp. 1867–1884, 2013.

[64] D. Coakley, P. Raftery, and M. Keane, “A review of methods to match building energy simulation models to measured data,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 37, pp. 123–141, 2014.

[65] E. Fabrizio and V. Monetti, “Methodologies and advancements in the calibration of building energy models,” *Energies*, vol. 8, no. 4, pp. 2548–2574, 2015.

[66] A. Mihai, “Calibration of a Building Energy Model Using Measured Data for a Research”, MSc. Thesis, Concordia University, Montreal, Canada, 2014.

[67] O. Guerra-Santin and C. Tweed, “In-use monitoring of buildings: An overview of data collection methods”, *Energy Build.*, vol. 93, pp. 189–207, 2015.

[68] Department of Climate Change and Energy Efficiency of Australia, “The Environmental Measurement of Residential Buildings A Technical Guide”, Australia, 2011. [Online]. Available: http://nathers.gov.au/sites/prod.nathers/files/publications/Tech%20Guide-Envir%20Measure%20Resid%20Blds.pdf

[69] American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers - ASHRAE, “Measurement of energy and demand savings, *ASHARE Guideline 14”*, vol. 8400, pp. 1–165, 2002.

[70] A. Pedrini, F. S. Westphal, and R. Lamberts, “A methodology for building energy next term modelling and previous term calibration next term in warm climates,” *Build. Environ.*, vol. 37, Issue , p. 903 – 912, 2002.

[71] S. Bertagnolio, F. Randaxhe, and V. Lemort, “Evidence-based calibration of a building energy simulation model : Application to an office building in Belgium,” In Twelfth International Conference for Enhanced Building Operations ICEBO, Manchester, England, 2012.

[72] M. Royapoor and T. Roskilly, “Building model calibration using energy and environmental data,” *Energy Build.*, vol. 94, pp. 109–120, 2015.

[73] G. Mustafaraj, D. Marini, A. Costa, and M. Keane, “Model calibration for building energy efficiency simulation,” *Appl. Energy*, vol. 130, pp. 72–85, 2014.

[74] C. Yan, “ENERGY PERFORMANCE ASSESSMENT AND DIAGNOSIS FOR INFORMATION POOR BUILDINGS,” PhD. Thesis. The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China, 2013.

[75] N. N. Abu Bakar, M. Y. Hassan, H. Abdullah, H. A. Rahman, M. P. Abdullah, F. Hussin, and M. Bandi, “Energy efficiency index as an indicator for measuring building energy performance: A review”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 44, pp. 1–11, 2015.

[76] Ihobe, “Green Building Rating Systems: ¿Cómo evaluar la sostenibilidad en la edificación?”, 2010. [Online]. Available: . http://www.ihobe.eus/Publicaciones/ficha.aspx?IdMenu=750e07f4-11a4-40da-840c-0590b91bc032&Cod=2e2fd25e-c820-4fe5-9b29-504f39e432ee&Idioma=es-ES&Tipo=

[77] R. Gonzales Falcon, “Caracterización y Evaluación Energética De Edificios Existentes En Base a Medidas. Aplicacion Al Sector Residencial”, Phd Thesis, Universidad de Sevilla, Sevilla, España, 2007.

[78] C. A. Roulet, F. Flourentzou, H. H. Labben, M. Santamouris, I. Koronaki, E. Dascalaki, and V. Richalet, “ORME: A multicriteria rating methodology for buildings”, *Build. Environ.*, vol. 37, no. 6, pp. 579–586, 2002.

[79] D. McLean, Y. Roderick, H. Quincey, and D. McEwan, “CLIMATE ENERGY INDEX AND BUILDING ENERGY INDEX : NEW INDICES TO ASSESS AND BENCHMARK BUILDING ENERGY PERFORMANCE”, in *12th Conference of International Building Performance Simulation Association*, Sydney*,* Australia, 2011.

[80] F. Lucas, M. David, O. Marc, J. François, B. Brangeon, and F. Picgirard, “PROCEDURE FOR PERFORMANCE DIAGNOSTIC FOR SMALL AIR CONDITIONING SYSTEMS USING DYNAMIC SIMULATIONS”, in *12th Conference of International Building Performance Simulation Association*, Sydney*,* Australia, 2011.

[81] H. Hernandez and L. Meza, “Propuesta de una metodología de certifi cación de efi ciencia energética para viviendas en Chile,” *Rev. la Construcción*, vol. 10, no. 1, pp. 53–63, 2011.

[82] G. A. Osma, “Uso racional de la energía a partir del diseño de aplicaciones sostenibles en el edificio eléctrica II de la Universidad Industrial de Santander”, MSc Thesis, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2011.

[83] Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio de Colombia, *Resolución 0549*. 2015. [Online]. Available: http://www.minvivienda.gov.co/ResolucionesVivienda/0549%20-%202015.pdf

[84] S. Varela, “Evaluación de un edificio para oficinas según requerimientos de la norma ASHRAE 90.1, para tres zonas climáticas de Chile”, Undergraduate Thesis, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2011.

[85] American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers -

ASHRAE, “ASHRAE STANDARD Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings”, Atlanta, 2009.

[86] Y. Roderick, D. Mcewan, C. Wheatley, and C. Alonso, “A Comparative Study of Building Energy Assessment Between Leed Breeam and Green Star Schemens.” ”, in *12th Conference of International Building Performance Simulation Association*, Sydney, Australia, 2011.

[87] Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, “*APLICACIÓN DE LA RESOLUCIÓN DE CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE: RESOLUCIÓN 0549”*, Bogotá, Colombia, 2016. [Online]. Available: http://camacol.co/sites/default/files/IT-Reglamentos/Presentacion_Taller_Construccionsostenible2016.pdf

[88] M. Monrroy, “*MANUALES DE DISEÑO ICARO: ILUMINACIÓN”*. Editorial CDA, Palmas de Gran Canaria, España, 2006. [Online]. Available: http://editorial.cda.ulpgc.es/ftp/icaro/Manual-1-ILUMINACION.pdf

[89] Centro de Investigación en Tecnologías de la Construcción - CITEC, “*Manual de Diseño Pasivo y Eficiencia Energética en Edificios Públicos”*. Santiago de Chile, Chile, 2012. [Online]. Available: http://www.arquitecturamop.cl/centrodocumental/Documents/Manual-de-diseno-pasivo-y-eficiencia-energetica-en-edif%20Publicos_Parte1.pdf

[90] P. Andrea, Capitulo 11: *Luz Natural e Iluminación de Interiores*, in Manual de Iluminación Eficiente, Editorial Universidad Tecnológica Nacional, Sarmiento, Argentina, 2000. [Online]. Available: http://www.edutecne.utn.edu.ar/eli-iluminacion/cap11.pdf

[91] *MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA. Reglamento Tecnico de Iluminación y Alumbrado Público – RETILAP*”, Bogotá, Colombia. 2016. [Online]. Available: https://www.minminas.gov.co/retilap

[92] IDAE, “*Guía Técnica. Aprovechamiento de la luz natural en la iluminación de edificios”.* España, 2005. [Online]. Available: http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10055_GT_aprovechamiento_luz_natural_05_c7e314e8.pdf

[93] Fundación HABITEC, “*Guía de edificios residenciales de alta calificación energética e integración de energías renovables*”, Málaga, España, 2011. [Online]. Available: http://www.upv.es/contenidos/CAMUNISO/info/U0724083.pdf

[94] Proyecto Enforce, “*Guía práctica sobre ahorro y eficiencia energética en los edificios”*, 2010. [Online]. Available: http://cecu.es/publicaciones/guia%20enforce.pdf

[95] Área Metropolitana del Valle de Aburra, “*Guía para el diseño de edificaciones sostenibles”*. Medellín, Colombia, 2015. [Online]. Available: http://www.metropol.gov.co/ConstruccionSostenible/Documents/GCS4EdificacionesSostenibles.pdf

[96] Catalina Gutiérrez - ArchDaily, “Ecotect: Software de Diseño de Construcción Sustentable | ArchDaily Colombia,” 2010. [Online]. Available: http://www.archdaily.co/co/02-62481/ecotect-software-de-diseno-de-construccion-sustentable. [Accessed: 02-Aug-2016].

[97] S. Echeverria and T. Liceth, “RECOMENDACIONES PARA EL MEJORAMIENTP DE LA REALIZACIÓN Y LA EVALUACIÓN DEL DISEÑO ENERGÉTICO VERDE DE EDIFICACIONES EN LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER,” Undergrade Thesis, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2014.

[98] U.S. Departament of Energy, “EnergyPlus Version 8.6 Documentation: Getting Started,” 2016. [Online]. Available: https://energyplus.net/sites/all/modules/custom/nrel_custom/pdfs/pdfs_v8.6.0/GettingStarted.pdf

[99] T. Maile, M. Fischer and V. Bazjanac, “Building Energy Performance Simulation Tools - a Life-Cycle and Interoperable Perspective”, C*enter for Integrated Facility Engineering.*, Stanfor University, 2007. [Online]. Available: http://cife.stanford.edu/sites/default/files/WP107.pdf

[100] M. Millan and R. Mantilla, “Herramientas computacionales para análisis energético de viviendas de interés social”, Undergraduate Thesis, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2013.

[101] DesignBuilder Latinoamérica, “Características de DesignBuilder,” 2016. [Online]. Available: http://www.designbuilder-lat.com/caracteristicas-designbuilder. [Accessed: 02-Aug-2016].

[102] C. Villalba and N. Ortiz, “Análisis comparativo de simulación energética entre DesignBuilder y EnergyPlus”, Undergraduate Thesis, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2016.

[103] J. Roa, B. Roa, and M. Pinto, “Estimación del potencial impacto de la implementación de estrategias URE en iluminación y climatización en el Edificio de Estudios Industrial y Empresariales a partir de la herramienta eQUEST”, Undergrade Thesis, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2015.

[104] Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible and Ministerio de minas y energía, “Presentación: DISEÑO Y SOCIALIZACIÓN DE EFICIENCIA ENERGETICA PARA VIVIENDAS DE INTERES SOCIAL (RETEVIS)”, 2010. [Online]. Available: http://www.upme.gov.co/Docs/Seminarios/2011/EEE/ESPERANZA_CARO.pdf.

[105] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, “Edificaciones Sostenibles,” 2016. [Online]. Available: http://www.minambiente.gov.co/index.php/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/gestion-ambiental-urbana/edificaciones-sostenibles. [Accessed: 22-Nov-2016].

[106] “Standard 90.1 | ashrae.org.” [Online]. Available: https://www.ashrae.org/resources--publications/bookstore/standard-90-1. [Accessed: 20-Oct-2014].

[107] EnergyPlus Software, “Testing and Validation.” [Online]. Available: https://energyplus.net/testing. [Accessed: 22-Nov-2016].

[108] J. Gutierrez and A. Merchan, “Descripción del comportamiento energético de una vivienda de Interés social a partir de la simulación con Designbuilder”, Undergraduate Thesis, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2014.

[109] C. Caicedo, A. Torres, and S. Sánchez, “Análisis energético del Edificio de Ingeniería Eléctrica a partir del uso de la herramienta DesignBuilder: Calibración y simulaciones”, Undergraduate Thesis, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2015.

BIBLIOGRAFÍA

Abu Bakar N. N et al. “Energy efficiency index as an indicator for measuring building energy performance: A review”, Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 44, pp. 1–11, 2015.

Attia S., “State of the Art of Existing Early Design Simulation Tools for Net Zero Energy Buildings : A Comparison of Ten Tools”, Catholic University of Louvain, Tech. Rep. 2011. [Online]. Available: http://www-climat.arch.ucl.ac.be/s_attia/attia_nzeb_tools_report.pdf

Attia S. and Neuve L., “Building Performance Simulation Tools : Selection Criteria and User Survey”, Catholic University of Louvain, Tech. Rep, 2010. [Online]. Available: http://www-climat.arch.ucl.ac.be/s_attia/Attia_BPSTools_SelectionCriteriaUserSurvey_Rreport.pdf

ASHRAE, The American Institute of Architects, Illuminating Engineering Society of North America, U. S. G. B. Council, and U.S. Departament of Energy, Advanced Energy Design Guide for Grocery Stores. Atlanta, 2015.

ASHRAE, The American Institute of Architects, Illuminating Engineering Society of North America, U.S Green Building Council, and U.S. Departament of Energy, Advanced Energy Design Guide for Highway Lodging. Atlanta, 2009.

ASHRAE, The American Institute of Architects, Illuminating Engineering Society of North America, U.S Green Building Council, and U.S. Departament of Energy, “Advanced Energy Design Guide for Large Hospitals.” Atlanta, 2012.

ASHRAE, The American Institute of Architects, Illuminating Engineering Society of North America, U.S Green Building Council, and U.S. Departament of Energy, Advanced Energy Design Guide for Medium to Big Box Retail Buildings. Atlanta, 2011.

ASHRAE, The American Institute of Architects, Illuminating Engineering Society of North America, U.S. Departament of Energy, and U.S. Green Building Council, “Advanced Energy Design Guide for Small to Medium Office Buildings.” Atlanta, 2011.

ASHRAE, The American Institute of Architects, Illuminating Engineering Society of North America, U.S Green Building Council, and U.S. Departament of Energy, Advanced Energy Design Guide for K-12 School Buildings. Atlanta, 2011.

ASHRAE, The American Institute of Architects, Illuminating Engineering Society of North America, U.S. Green Building Council, and U.S. Departament of Energy, Advanced Energy Design Guide for Small Warehouses and Self-Storage Buildings. Atlanta, 2008.

ASHRAE, “2009 Ashrae Handbook: Fundamentals,” vol. 30329, no. 404. Atlanta, 2009.

Attia S., “EARLY DESIGN SIMULATION TOOLS FOR NET ZERO ENERGY BUILDINGS : A COMPARISON OF TEN TOOLS DESIGN PROCESS & TOOLS OF

NZEB," in 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney, Australia, 2011.

Attia S, Beltrán L., De Herde A., and Hensen J., "Architect Friendly: A Comparison of Ten Different Building Performance Simulation Tools," in the Eleventh Conference of International Building Simulation Association, Glasgow, Scotland, 2009.

ASHRAE, "Measurement of energy and demand savings, ASHARE Guideline 14", vol. 8400, pp. 1–165, 2002.

ASHRAE, "ASHRAE STANDARD Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings", Atlanta, 2009.

Área Metropolitana del Valle de Aburra, "Guía para el diseño de edificaciones sostenibles". Medellín, Colombia, 2015. [Online]. Available: http://www.metropol.gov.co/ConstruccionSostenible/Documents/GCS4EdificacionesSostenibles.pdf

ASHRAE [Online]. Available: https://www.ashrae.org/resources--publications/bookstore/standard-90-1. [Accessed: 20-Oct-2014].

Bastide A., Lauret P., and Boyer H., "Building energy efficiency and thermal comfort in tropical climates Presentation of a numerical approach for predicting the percentage of well-ventilated living spaces in buildings using natural ventilation," Energy Build., vol. 38, pp. 1093–1103, 2006.

BC GREEN BUILDING ROUNDTABLE, "ROADMAP FOR THE INTEGRATED DESIGN PROCESS," 2007. [Online]. Available: http://www.greenspacencr.org/events/IDProadmap.pdf

Baba A., Mahdjoubi L., Olomolaiye P., and C. Booth, "State-of-the-art on buildings performance energy simulations tools for architects to deliver low impact building (LIB) in the UK," Int. J. Dev. Sustain., vol. 2, no. 3, pp. 1867–1884, 2013.

Bertagnolio S., Randaxhe F., and Lemort V., "Evidence-based calibration of a building energy simulation model : Application to an office building in Belgium," In Twelfth International Conference for Enhanced Building Operations ICEBO, Manchester, England, 2012.

Crawley D. B., Hand J. W., Kummert M., and Griffith B. T., "Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs," Build. Environ., vol. 43, no. 4, pp. 661–673, Apr. 2008.

Carvalho M. M. Q., La Rovere E. L., and Gonc A., "Analysis of variables that influence electric energy consumption in commercial buildings in Brazil," Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 14, pp. 3199–3205, 2010.

Chan K. and Chow W., "Energy impact of commercial-building envelopes in the sub-tropical climate," Appl. Energy, vol. 60, 1998.

Coakley D., Raftery, and Keane M., “A review of methods to match building energy simulation models to measured data,” Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 37, pp. 123–141, 2014.

Centro de Investigación en Tecnologías de la Construcción - CITEC, “Manual de Diseño Pasivo y Eficiencia Energética en Edificios Públicos”. Santiago de Chile, Chile, 2012. [Online]. Available: http://www.arquitecturamop.cl/centrodocumental/Documents/Manual-de-diseno-pasivo-y-eficiencia-energetica-en-edif%20Publicos_Parte1.pdf

Caicedo C., Torres A., and Sánchez S., “Análisis energético del Edificio de Ingeniería Eléctrica a partir del uso de la herramienta DesignBuilder: Calibración y simulaciones”, Undergraduate Thesis, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2015.

Dixit M., Fernández-Solís J., Lavy S., and Culp C., “Identification of parameters for embodied energy measurement: A literature review,” Energy Build., vol. 42, no. 8, pp. 1238–1247, Aug. 2010.

Department of Climate Change and Energy Efficiency of Australia, “The Environmental Measurement of Residential Buildings A Technical Guide”, Australia, 2011. [Online]. Available: http://nathers.gov.au/sites/prod.nathers/files/publications/Tech%20Guide-Envir%20Measure%20Resid%20Blds.pdf

DesignBuilder Latinoamérica, “Características de DesignBuilder,” 2016. [Online]. Available: http://www.designbuilder-lat.com/caracteristicas-designbuilder. [Accessed: 02-Aug-2016].

El Sherif S. K., “The Impact of Overhangs and Side-fins on Building Thermal Comfort, Visual Comfort and Energy Consumption in the Tropics,” MSc Thesis, The Brithish University in Dubai, 2012. [Online]. Available: http://bspace.buid.ac.ae/handle/1234/139

Echeverria S. and Liceth T., “RECOMENDACIONES PARA EL MEJORAMIENTP DE LA REALIZACIÓN Y LA EVALUACIÓN DEL DISEÑO ENERGÉTICO VERDE DE EDIFICACIONES EN LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER,” Undergrade Thesis, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2014.

EnergyPlus Software, “Testing and Validation.” [Online]. Available: https://energyplus.net/testing. [Accessed: 22-Nov-2016].

Fabrizio E. and Monetti V., “Methodologies and advancements in the calibration of building energy models,” Energies, vol. 8, no. 4, pp. 2548–2574, 2015.

Fundación HABITEC, “Guía de edificios residenciales de alta calificación energética e integración de energías renovables”, Málaga, España, 2011. [Online]. Available: http://www.upv.es/contenidos/CAMUNISO/info/U0724083.pdf

Fan L.; et al. “Comparison of Simulation Tools for Optimization and Evaluation of Green Building Performance in China,” in 13th Conference of international Building Simulation Association, Chambéry, France, 2013.

Guerra-Santin O. and Tweed C., “In-use monitoring of buildings: An overview of data collection methods”, Energy Build., vol. 93, pp. 189–207, 2015.

Gonzales Falcon R., “Caracterización y Evaluación Energética De Edificios Existentes En Base a Medidas. Aplicacion Al Sector Residencial”, Phd Thesis, Universidad de Sevilla, Sevilla, España, 2007.

Gutierrez J. and Merchan A., “Descripción del comportamiento energético de una vivienda de Interés social a partir de la simulación con Designbuilder”, Undergraduate Thesis, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2014.

Gutiérrez C. - ArchDaily, “Ecotect: Software de Diseño de Construcción Sustentable | ArchDaily Colombia,” 2010. [Online]. Available: http://www.archdaily.co/co/02-62481/ecotect-software-de-diseno-de-construccion-sustentable. [Accessed: 02-Aug-2016].

Häkkinen T., “Sustainability and performance assessment and benchmarking of buildings,” Tech. Rep, 2012. [Online]. Available: http://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2012/T72.pdf

Hernandez H. and Meza L., “Propuesta de una metodología de certifi cación de efi ciencia energética para viviendas en Chile,” Rev. la Construcción, vol. 10, no. 1, pp. 53–63, 2011.

Hopfe C., “Uncertainty and sensitivity analysis in building performance simulation for decision support and design optimization,” Ph.D. thesis, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, 2009.

Hirata E. and Ricciarini S., “Perspectiva Holística de la Eficiencia Energética en Edificaciones - Los Códigos Internacionales,” in Seminario Internacional - Eficiencia energética e Edificaciones, Bogotá, Colombia, 2011. [Online]. Available: www.upme.gov.co/Docs/Seminarios/2011/EEE/7%20EVANGELINA%20HIRATA.pdf

Hemsath T., “CONCEPTUAL ENERGY MODELING ARCHITECTURE, PLANNING AND DESIGN: IMPACT OF USING PERFORMANCE SIMULATION IN EARLY DESIGN STAGES,” in 13th Conference of international Building Simulation Association, Chambéry, France, 2013.

Hui C., “BUILDING ENERGY SIMULATION METHODS,” in Energy Performance of Air-conditioned Buildings in Hong Kong, PhD thesis, City University of Hong Kong. 1996, pp. 168–223. [Online]. Available: https://web.hku.hk/~cmhui/thesis/toc.htm

Hong T., Chou S., and Bong T., “Building simulation : an overview of developments and information sources,” Build. and Env., vol. 35, pp. 347–361, 2000.

International Energy Agency – IEA, “Integrated Design Process Guideline,” 2003. [Online]. Available: http://archive.iea-shc.org/task23/publications/IDPGuide_internal.pdf

IHOBE, “Green Building Rating Systems: ¿Cómo evaluar la sostenibilidad en la edificación?”, 2010. [Online]. Available: http://www.ihobe.eus/Publicaciones/ficha.aspx?IdMenu=750e07f4-11a4-40da-840c-0590b91bc032&Cod=2e2fd25e-c820-4fe5-9b29-504f39e432ee&Idioma=es-ES&Tipo=

IDAE, “Guía Técnica. Aprovechamiento de la luz natural en la iluminación de edificios”. España, 2005. [Online]. Available: http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10055_GT_aprovechamiento_luz_natural_05_c7e314e8.pdf

Jamaludin N., Khamidi M. F., Abdul Wahab S. N., and Klufallah M., “Indoor Thermal Environment in Tropical Climate Residential Building,” E3S Web Conf., vol. 3, Bangi, Malaysia, 2014.

Jahnkassim P. S., “ENERGY STRATEGIES IN THE TROPICAL CONTEXT – THE USE OF SIMULATION TOOLS IN INFORMING URBAN BIOCLIMATIC DESIGN IN A MALAYSIAN HIGHRISE DEVELOPMENT,” in The 2005 Word Sustainable Building Conference, Tokio, Japon, 2005.

Kwong Q. J., Adam N. M., and Sahari B. B., “Thermal comfort assessment and potential for energy efficiency enhancement in modern tropical buildings: A review,” Energy Build., vol. 68, pp. 547–557, Jan. 2014.

Kim H., Stumpf A., and Kim W., “Analysis of an energy efficient building design through data mining approach,” Autom. Constr., vol. 20, no. 1, pp. 37–43, Jan. 2011.

Kolokotsa D., Diakaki C., Grigoroudis E., Stavrakakis G., and Kalaitzakis K., “Decision support methodologies on the energy efficiency and energy management in buildings,” Adv. Build. Energy Res., vol. 3, no. 1, pp. 121–146, Jan. 2009.

Koch C. and Buhl H., “‘ Integrated Design Process ’ a Concept for Green Energy Engineering,” Engineering, Vol. 5 No. 3, 2013, pp. 292-298.

Lucas F. et al. , “PROCEDURE FOR PERFORMANCE DIAGNOSTIC FOR SMALL AIR CONDITIONING SYSTEMS USING DYNAMIC SIMULATIONS”, in 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney, Australia, 2011.

Mallick F. H., “Therman comfort and building design in the tropical climates,” Energy Build., vol. 23, pp. 161–167, 1996.

MAyDS Colombia, “Criterios ambientales para el diseño y construcción de vivienda urbana.” Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Bogotá, 2012. [Online]. Available: http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/Sello_ambiental_colombiano/cartilla_criterios_amb_diseno_construc.pdf

Mustafaraj G., Marini D., Costa A., and Keane M., “Model calibration for building energy efficiency simulation,” Appl. Energy, vol. 130, pp. 72–85, Oct. 2014.

Markovic D., Cvetkovic D., and Masic B., “Survey of software tools for energy efficiency in a community,” Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 15, no. 9, pp. 4897–4903, Dec. 2011.

Mourshed M. M., Kelliher D., and Keane M., “Integrating Building Energy Simulation in the design process,” IBPSA, vol. 13, pp. 21–26, 2003.

Morbitzer C., Strachan P., Webster J., Spires B., and Cafferty D., “INTEGRATION OF BUILDING SIMULATION INTO THE DESIGN PROCESS OF AN ARCHITECTURE,” in Seventh International IBPSA Conference, Rio de Janeiro, Brazil, 2001.

Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio,”Anexo No. 1 de la Resolución 0549: Guía de construcción sostenible para el ahorro de agua y energía en edificaciones”. Bogotá, Colombia, 2015. [Online]. Available: http://camacol.co/sites/default/files/IT-Reglamentos/ANEXO%201%20Guia%20de%20construccion%20sostenible%20-%20JULIO%208%202015.pdf

Mihai A., “Calibration of a Building Energy Model Using Measured Data for a Research”, MSc. Thesis, Concordia University, Montreal, Canada, 2014.

McLean D., Roderick Y., Quincey H., and McEwan D., “CLIMATE ENERGY INDEX AND BUILDING ENERGY INDEX : NEW INDICES TO ASSESS AND BENCHMARK BUILDING ENERGY PERFORMANCE”, in 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney, Australia, 2011.

Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio de Colombia, Resolución 0549. 2015. [Online]. Available: http://www.minvivienda.gov.co/ResolucionesVivienda/0549%20-%202015.pdf

Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, “APLICACIÓN DE LA RESOLUCIÓN DE CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE: RESOLUCIÓN 0549”, Bogotá, Colombia, 2016. [Online]. Available: http://camacol.co/sites/default/files/IT-Reglamentos/Presentacion_Taller_Construccionsostenible2016.pdf

Monrroy M., “MANUALES DE DISEÑO ICARO: ILUMINACIÓN”. Editorial CDA, Palmas de Gran Canaria, España, 2006. [Online]. Available: http://editorial.cda.ulpgc.es/ftp/icaro/Manual-1-ILUMINACION.pdf

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA. Reglamento Tecnico de Iluminación y Alumbrado Público – RETILAP”, Bogotá, Colombia. 2016. [Online]. Available: https://www.minminas.gov.co/retilap

Maile T., Fischer M. and Bazjanac V., “Building Energy Performance Simulation Tools - a Life-Cycle and Interoperable Perspective”, Center for Integrated Facility Engineering., Stanfor University, 2007. [Online]. Available: http://cife.stanford.edu/sites/default/files/WP107.pdf

Millan M. and Mantilla R., “Herramientas computacionales para análisis energético de viviendas de interés social”, Undergraduate Thesis, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2013.

Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible and Ministerio de minas y energía, “Presentación: DISEÑO Y SOCIALIZACIÓN DE EFICIENCIA ENERGETICA PARA VIVIENDAS DE INTERES SOCIAL (RETEVIS)”, 2010. [Online]. Available: http://www.upme.gov.co/Docs/Seminarios/2011/EEE/ESPERANZA_CARO.pdf.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, “Edificaciones Sostenibles,” 2016. [Online]. Available: http://www.minambiente.gov.co/index.php/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/gestion-ambiental-urbana/edificaciones-sostenibles. [Accessed: 22-Nov-2016].

Oropeza-perez I. and Alberg P., “Energy saving potential of utilizing natural ventilation under warm conditions – A case study of Mexico,” Appl. Energy, vol. 130, pp. 20–32, 2014.

Okeil A., “A holistic approach to energy efficient building forms,” Energy Build., vol. 42, no. 9, pp. 1437–1444, Sep. 2010.

Osma G., “Uso racional de la energía a partir del diseño de aplicaciones sostenibles en el edificio eléctrica II de la Universidad Industrial de Santander”, MSc Thesis, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2011.

Pattini A., Capitulo 11: Luz Natural e Iluminación de Interiores, in Manual de Iluminación Eficiente, Editorial Universidad Tecnológica Nacional, Sarmiento, Argentina, 2000. [Online]. Available: http://www.edutecne.utn.edu.ar/eli-iluminacion/cap11.pdf

Prianto E. and Depecker P., “Optimization of architectural design elements in tropical humid region with thermal comfort approach,” Energy Build., vol. 35, pp. 273–280, 2003.

Pérez-Lombard L., Ortiz J., and Pout C., “A review on buildings energy consumption information,” Energy Build., Volume 40, Issue 3, 2008, Pages 394–398.

Pollock M., Roderick Y., Mcewan D., and Wheatley C., “Building simulation as an assisting tool in designing an energy efficient building : a case study.” in Eleventh Conference of international Building Simulation Association, Glasgow, Scotland, 2009.

Pedrini A., Westphal F. S., and Lamberts R., “A methodology for building energy next term modelling and previous term calibration next term in warm climates,” Build. Environ., vol. 37, Issue, p. 903 – 912, 2002.

Proyecto Enforce, “Guía práctica sobre ahorro y eficiencia energética en los edificios”, 2010. [Online]. Available: http://cecu.es/publicaciones/guia%20enforce.pdf

Ramesh T., Prakash R., and Shukla K., “Life cycle approach in evaluating energy performance of residential buildings in Indian context,” Energy Build., vol. 54, pp. 259–265, Nov. 2012.

Rallapalli H. S., “A comparison of EnergyPlus and eQUEST: Whole Building Energy Simulation Results for a Medium Sized Office Building,”MSc thesis, Arizona State University, Tempe, 2010.

Ring H. and Knudstrup M., “The integrated Design Process (IDP) - A more holistic approach to sustainable architecture.,” in The 2005 World Sustainable Building Conference, Tokio, Japon, 2005.

Royapoor M. and Roskilly T., “Building model calibration using energy and environmental data,” Energy Build., vol. 94, pp. 109–120, 2015.

Roulet C., Flourentzou F., Labben H., Santamouris M., Koronaki I., Dascalaki E., and Richalet V., “ORME: A multicriteria rating methodology for buildings”, Build. Environ. vol. 37, no. 6, pp. 579–586, 2002.

Roderick Y., Mcewan D., Wheatley C., and Alonso C., “A Comparative Study of Building Energy Assessment Between Leed Breeam and Green Star Schemens.” ”, in 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney, Australia, 2011.

Roa J., Roa B., and Pinto M., “Estimación del potencial impacto de la implementación de estrategias URE en iluminación y climatización en el Edificio de Estudios Industrial y Empresariales a partir de la herramienta eQUEST”, Undergrade Thesis, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2015.

Sosa M. E. and Siem G., “MANUAL DE DISEÑO PARA EDIFICACIONES ENERGÉTICAMENTE EFICIENTES EN EL TRÓPICO”, IDEC, Primera Edición, Caracas, Venezuela, 2004. [Online]. Available: https://www.fau.ucv.ve/idec/racionalidad/pdf/manual_energia.pdf

The American Institute of Architects –AIA, “Integrated Project Delivery : A Guide”, 2007. [Online]. Available:http://info.aia.org/siteobjects/files/ipd_guide_2007.pdf

The American Institute of Architects – AIA, “An Architect’s Guide to Integrating Energy Modeling in the design process”, 2012. [Online]. Available: http://aiad8.prod.acquia-sites.com/sites/default/files/2016-04/Energy-Modeling-Design-Process-Guide.pdf

Trebilcock M., “Proceso de Diseño Integrado: nuevos paradigmas en arquitectura sustentable,” Arquitetura Rev., vol. 5, no. 2, pp. 65–75, Nov. 2009.

USAID, “DOCUMENTO TÉCNICO DE SOPORTE - RECOMENDACIONES DE POLÍTICA PÚBLICA DE CONSTRUCCIÓN Y URBANISMO SOSTENIBLE INFORME FINAL,” Bogotá, 2013.[Online]. Available: www.sdp.gov.co/.../Politica_Publica_Ecourbanismo/DTS_PPECS_V5_140526_1.pdf

Unidad de Planeación Minero Energética – UPME, “Balance energético Colombiano BECO 1975 -2015” [Online]. Available: http://www1.upme.gov.co/balance-energetico-colombiano-1975-2015

Unidad de Planeación Minero Energética – UPME, “Proyección de Demanda de Energía en Colombia,” 2010. [Online]. Available: http://www.upme.gov.co/Docs/Energia/PROYECC_DEMANDA_ENERGIA_OCTUBRE_2010.pdf

United Nations Human Settlements Programe, SUSTAINABLE BUILDING DESIGN FOR TROPICAL CLIMATES: Principles and Applications for Eastern Africa. 2014. [Online]. Available: http://unhabitat.org/books/sustainable-building-design-for-tropical-climates/

U.S. Departament of Energy, “EnergyPlus Version 8.6 Documentation: Getting Started,” 2016. [Online]. Available: https://energyplus.net/sites/all/modules/custom/nrel_custom/pdfs/pdfs_v8.6.0/GettingStarted.pdf

Varela S., “Evaluación de un edificio para oficinas según requerimientos de la norma ASHRAE 90.1, para tres zonas climáticas de Chile”, Undergraduate Thesis, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2011.

Villalba C. and Ortiz N., “Análisis comparativo de simulación energética entre DesignBuilder y EnergyPlus”, Undergraduate Thesis, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2016.

Wilde P., “Computational Support for the Selection of Energy Saving Building Components”, PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 2004.

Wang S., Yan C., and Xiao F., “Quantitative energy performance assessment methods for existing buildings,” Energy Build., vol. 55, pp. 873–888, Dec. 2012.

WWF España and Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino, “Guía de ahorro y eficiencia energética en oficinas”, Madrid, 2008. [Online]. Available: http://www.officinaseficientes.es/docs/guia_OFF.pdf

Weytjens L., Attia S., Verbeeck G., and De Herde A., “A comparative study of the ‘ architect - friendliness ’ of six building performance simulation tools”, International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development, Vol. 2, no. 3, pp. 237-244, 2012.

Yan C., “ENERGY PERFORMANCE ASSESSMENT AND DIAGNOSIS FOR INFORMATION POOR BUILDINGS,” PhD. Thesis. The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China, 2013.

ANEXOS

ANEXO A. Encuesta para la caracterización del proceso de diseño energético

Este anexo presenta los principales hallazgos de la “Encuesta para la Caracterización del Proceso de Diseño Energético” realizada a un grupo de interesados en el diseño verde que pertenecen a diferentes empresas del Área Metropolitana de Bucaramanga. Dicha encuesta fue realizada en marzo de 2015 en el marco de una visita técnica al Edificio de Ingeniería Eléctrica de la UIS. La Figura A.1 presenta la ficha de la encuesta.

Figura A.1. Ficha de la encuesta.

Encuesta para la caracterización del proceso de diseño energético de edificaciones

Esta encuesta está orientada a establecer información sobre el proceso de diseño de edificaciones en el Área Metropolitana de Bucaramanga; a partir de la cual, el grupo de Investigación GISEL (UIS) estudiará estrategias de comunicación asertiva entre la Universidad y diversos actores relacionados con el sector de la construcción en la temática del uso racional de la energía (URE) en edificaciones.

1. ¿Cuáles de las siguientes tareas son tenidas en cuenta en su organización a la hora de diseñar una edificación?

A. Análisis conjunto del diseño por parte de los responsables de todos los sistemas de la edificación antes de la aprobación final del proyecto.
B. Realización de estudios técnicos para el mejoramiento de la sostenibilidad de la edificación
C. Modelado virtual de la edificación diseñada.

2. ¿Cuáles de las siguientes herramientas computacionales son utilizadas como apoyo en el proceso de diseño?

A. AutoCAD
B. SketchUP
C. Revit
D. ArchiCAD
E. Otra (Cuál) _____

3. Indique el orden de importancia de 1 a 5 los siguientes criterios en su organización *(1 más importante y 5 menos importante)*

A. Opinión del propietario del proyecto.
B. Reglamentación técnica y aspectos legales.
C. Reducción de daños sobre el medio ambiente.
D. Costo del proyecto
E. Confort del usuario final del proyecto.

4. ¿Cuáles de los siguientes aspectos de eficiencia energética son tenidos en cuenta en los diseños?

A. No se consideran aspectos de eficiencia energética.
B. Aprovechamiento de la luz natural y ventilación natural.
C. Automatización y control de iluminación y/o climatización.
D. Equipos de alta eficiencia.
E. Techos verdes (cubierta vegetal).
F. Estrategias de control solar (lamas, salientes, parasoles).
G. Sistemas de generación renovable.

5. Indique el orden de importancia de 1 a 5 de factores que impulsarían significativamente prácticas URE en los proyectos de su organización (1 más importante y 5 menos importante)

A. Exigencia del mercado (satisfacción del usuario final)
B. Reducción de impactos sobre el medio ambiente
C. Valor agregado para acrecentar el *good will* de la compañía
D. Reglamentación relacionada con construcción sostenible.

6. ¿Cuáles han sido las causas para que su organización no desarrolle proyectos desde el enfoque de construcción verde?

A. Falta de personal especializado y de herramientas de apoyo.
B. Falta de interés de los clientes.
C. Falta de interés de la organización.
D. Desconocimiento del tema por parte de la organización.
E. Percepción de alto costo financiero adicional.
F. Falta de estándares y guías orientativos.
G. Falta de reglamentación (exigencia legal).

7. ¿Qué conoce usted de las herramientas de simulación energética?

A. Hemos usado recientemente una de ellas
   i) DesignBuilder
   ii) Ecotect
   iii) eQUEST
   iv) EnergyPlus
   v) OpenStudio
   vi) Otra (¿Cuál?_____)
B. Las conocemos pero no las usamos.
C. No las conocemos.

La ficha de la encuesta fue estructurada en torno a siete preguntas que pretendían indagar sobre el grado de eficiencia energética presente en los proyectos de diseño de edificaciones de las empresas encuestadas, potenciales motivaciones para la aplicación de estrategias de uso racional de la energía (URE) y uso de herramientas computacionales de apoyo.

Las tablas A.1, A.2 y A.3 presentan los resultados de la encuesta. Éstos fueron tabulados de acuerdo al tipo de pregunta.

Tabla A.1. Resultados preguntas 1, 2 y 4.

Código	Pregunta 1				Pregunta 2						Pregunta 4							
	A	B	C	NA[27]	A	B	C	D	E	NA	A	B	C	D	E	F	G	NA
1	0	0	0	1	0		0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
2	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
3	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
4	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
5	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
6	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
7	0	1	0	0	0		0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
8	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
9	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
10	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
11	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0
12	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0
13	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
14	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
15	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0
16	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
17	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
TOTALES	8	6	0	5	12	0	3	0	0	4	2	6	5	6	1	1	2	4

[27] No aplica.

Tabla A.2. Resultados de las preguntas 6 y 7.

Código	Pregunta 6								Pregunta 7								
	A	B	C	D	E	F	G	NA	A						B	C	NA
									i	ii	iii	iv	v	vi			
1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
4	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
5	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
6	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
7	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
8	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
9	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
11	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
12	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
13	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0		0
14	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
15	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
17	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
19	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
TOTALES	5	6	1	4	7	4	4	1	2	0	0	0	0	0	1	15	1

Tabla A.3. Resultados de las preguntas 3 y 5.

Pregunta 3					Pregunta 5			
A	**B**	**C**	**D**	**E**	**A**	**B**	**C**	**D**
5	3	4	1	2	1	2	4	3
3	2	4	1	5	4	1	2	3
1	2	4	5	3	4	1	2	3
1	1	1	1	3	4	3	1	2
2	3	5	1	4	3	2	1	4
2	1	4	2	3	1	3	4	2
3	4	2	1	5	4	2	1	3
1	5	4	2	3	3	1	2	4
1	3	4	2	5	4	1	3	2
3	2	5	1	4	1	4	3	2
5	2	1	4	3	3	1	4	2
1	5	4	2	3	3	4	2	5

		2	3	1	5	4	1	2	3	2
		1	3	2	4	5	3	2	4	1
		4	1	2	3	5	1	2	4	3
		2	5	3	1	4	2	1	3	4
		5	3	2	4	1	3	1	4	2
		1	3	2	4	5	2	1	3	1
		3	1	2	5	4	3	2	4	1
	1	7	4	3	7	1	5	8	3	3
	2	4	4	6	4	1	2	7	4	7
Pesos	**3**	4	7	1	1	6	7	2	5	5
	4	1	1	7	4	6	5	2	7	3
	5	3	3	2	3	6				

Los principales hallazgos del análisis de los resultados de cada una de las preguntas son presentados en la Tabla A.4.

Tabla A4. Principales hallazgos de la encuesta.

Pregunta	Hallazgos
1	En cuanto a las tareas tenidas en cuenta por las organizaciones a la hora de realizar un diseño de una edificación se encontró que aproximadamente un 42% de los encuestados tiene en cuenta el análisis conjunto del diseño por parte de los responsables de todos los sistemas de la edificación antes de la aprobación final del proyecto; un 32% de los encuestados tienen en cuenta la realización de estudios técnicos para la mejora de la sostenibilidad de la edificación; mientras que sólo el 8 % tiene en cuenta el modelado virtual de la edificación diseñada. Para el 26 % restante la pregunta no aplica debido a que desde sus cargos desconocen el proceso de diseño de edificaciones.
2	Un 63 % de los encuestados responde que la principal herramienta de apoyo para el proceso de diseño de edificaciones que se desarrolla en su edificación es AUTOCAD; un 16 % prefiere a ArchiCAD. Para el 21% de los encuestados la pregunta no aplica.
3	De acuerdo con los resultados de esta pregunta, los criterios más importantes para las organizaciones de los encuestados son la opinión del propietario y los costos del proyecto. Por el contrario, los menos importantes son la reducción de los impactos sobre el medio ambiente y el confort de los usuarios.
4	Los aspectos de eficiencia energética que son tenidos en cuenta por la mayoría de los encuestados son el aprovechamiento de la iluminación y ventilación natural, y la instalación de equipos de alta eficiencia. Por el contrario, los menos considerados son la instalación de techos verdes y elementos de protección solar.
5	De acuerdo con los resultados de esta pregunta, la mayoría de los encuestados impulsaría practicas URE en los proyectos de su organización a fin de reducir los impactos sobre el medio ambiente. También lo harían si existiese una reglamentación relacionada construcción verde.
6	La principales causas por las que la organizaciones de los encuestados no desarrollan proyectos de construcción verde es la percepción de alto coste financiero adicional y hay una falta de interés por parte del cliente.
7	Solo el 11% de los encuestados uso recientemente una HSE (DesignBuilder u OpenStudio). El 79% dice no conocerlas y el aproximadamente el 5% dice conocerlas pero no usarlas. Para el 5% restante la pregunta no aplica.

ANEXO B. ESTRATEGIAS DE AHORRO ENERGÉTICO

Este anexo contiene un grupo de estrategias de ahorro energético aplicables a edificaciones en zonas tropicales. Éstas se encuentra clasificadas en cinco grupos: estrategias para mitigar la radiación solar, estrategias para el aprovechamiento de la ventilación natural, estrategias para el aprovechamiento de la iluminación natural, estrategias para el aprovechamiento de la energía solar, y estrategias para mejorar la eficiencia de los sistemas de la edificación.

ESTRATEGIAS PARA MITIGAR LA RADIACIÓN SOLAR

El calor penetra en las edificaciones proviene de diversas fuentes: el sol, a través de la radiación solar directa y difusa, así como por reflexión de las superficies cercanas; el aire y otras fuentes de calor como la ocupación, las instalaciones, los equipos y electrodomésticos. En el clima tropical, la causa más importante de calentamiento en el interior de las edificaciones es el sol, el cual actúa esencialmente de dos maneras: penetración directa por las aberturas y las superficies vidriadas; calentamiento de los cerramientos exteriores opacos, y la transmisión posterior al interior.

La envolvente almacena calor en mayor o menor medida y luego lo transmite al interior; este proceso depende de las propiedades termofísicas y características superficiales de los componentes constructivos. El mecanismo de transmisión de calor está asociado a dos conceptos importantes: el amortiguamiento que representa la diferencia entre la temperatura máxima interior y la máxima exterior; y, desfase y retardo representado por la diferencia en unidades de tiempo entre la máxima temperatura exterior e interior.

Aprovechamiento del contexto urbano y ambiental existente

La presencia de elementos del entorno urbano o ambiental tales como desniveles topográficos, masas de vegetación o edificios cercanos puede generar sombras en las parcelas que pueden ser aprovechados como protectores solares.

Las ganancias térmicas por radiación solar tienen su mayor impacto en las superficies perpendiculares a los rayos del sol, es decir en los techos y paredes este y oeste durante todo el año.

Figura B.1. Uso de vegetación para la mitigación de las ganancias solares. Tomado de [87].

En las edificaciones orientadas con las fachadas más estrechas hacia el este y el oeste se reduce la exposición solar en su ángulo más bajo y se obtienen mejores posibilidades de sombreado. La Tabla B.1 presenta una comparación de los beneficios de los elementos de paisajismos sobre uno de los servicios de mayor consumo energético en las edificaciones: el sistema de aire acondicionado.

Tabla B.1. Comparación de los beneficios de los elementos de paisajismo en la reducción de aire acondicionado. Adaptado de [53].

Elemento	Beneficios potenciales para el enfriamiento
Vegetación	Los árboles y arbustos convenientemente ubicados pueden proporcionar sombras y enfriamiento evaporativo, los cuales pueden reducir los requerimientos del aire acondicionado entre el 10% y el 50%.
Colores Claros	Simulaciones han demostrado que las superficies exteriores de colores claros pueden reducir las necesidades de energía de enfriamiento entre 30% y 50%, en comparación con los colores oscuros.
Superficies livianas	Los adoquines calados favorecen mayor disponibilidad de áreas verdes y contribuyen a una reducción adicional de la energía de enfriamiento.

Evitar la utilización de techos horizontales

En las zonas tropicales, próximas al ecuador, las superficies horizontales reciben la máxima intensidad solar, puesto que el ángulo de incidencia es muy cercano a la

perpendicular a la superficie durante un gran número de horas al día. Estos techos pueden recibir hasta 50% más de calor que los techos inclinados. Por tal razón se recomienda utilizar techos inclinados preferiblemente orientados sur – norte.

De igual forma se recomienda utilizar los techos como protección solar de las superficies verticales de la edificación. Los aleros de techo, pérgolas, corredores perimetrales son una solución apropiada para minimizarlas ganancias solares sobre paredes y ventanas. De igual forma se pueden emplear elementos de volumetría para producir sombra sobre los techos.

Uso de materiales reflectantes

Los colores claros en el techo pueden reflejar entre el 25% y el 30% de la energía radiante del sol. Las superficies claras, lisas y brillantes suelen tener reflectancia elevada en relación a la superficie blanca teórica de perfecta reflectancia, la cual absorbe 0% y refleja 100% de la radiación.

Figura B.2. Cubierta tratada con materiales reflectantes. Tomado de [87].

La Tabla B.2 muestra los valores de reflectancia para diferentes materiales de techo.

Tabla B.2. Reflectancia para diferentes materiales de techo. Adaptada de [53].

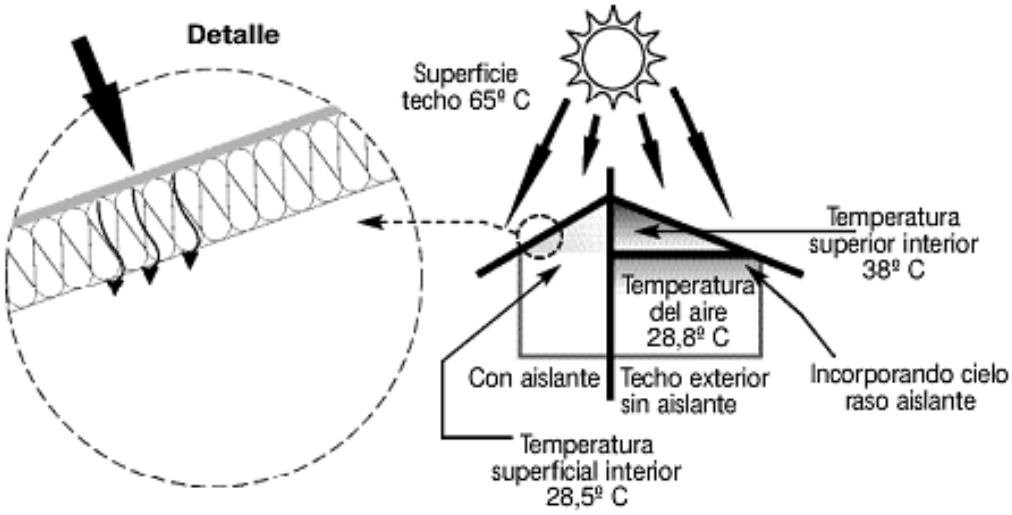
Material de techo	Reflectancia con acabado original [%]	Reflectancia con acabado blanco [%]
Capa de asfalto	5 – 15	31 – 35
Teja de arcilla	25 – 35	70 – 80
Teja de concreto	10 – 30	70 – 80
Capa o lámina de metal	70	70 – 80

Uso de materiales aislantes

Cuando se utilizan materiales aislantes en el techo se pueden reducir sustancialmente las ganancias de calor a través de estos componentes. El aislante puede ser instalado en el material del techo por el lado exterior (que es lo más efectivo para el clima cálido) o como cielo raso internamente; también puede utilizar se la combinación de ambas técnicas. Con 2 o 3 cm de material aislante es suficiente, aunque dependerá del tipo de material utilizado.

Los más adecuados son los que presentan las siguientes propiedades térmicas: baja capacidad calorífica y alta resistencia térmica, es decir, con muy baja conductancia. También es importante que el material aislante mantenga indefinidamente su coeficiente de conductividad y que no sea hidropónico, es decir, que no absorba humedad, lo cual disminuye su propiedad de aislante con el paso del tiempo. La Figura B.3 ejemplifica el uso de materiales aislantes en los techos de las edificaciones.

Figura B.3. Materiales aislantes en techo. Tomada de [53].

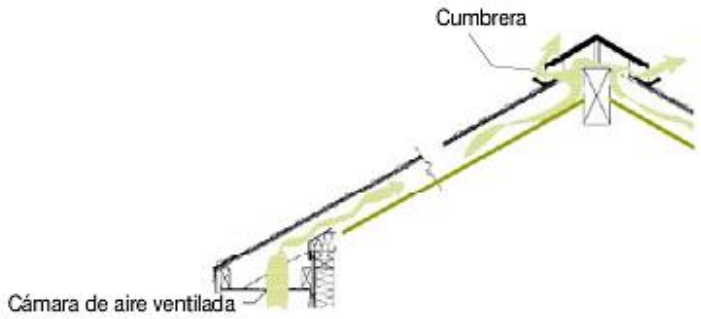


Cámaras de ventilación

El uso de cámaras de aire en los cerramientos constructivos es adecuado para mitigar las ganancias de calor, debido a que el aire es un material aislante con un coeficiente de conductividad térmico K= 0,028 W/m*k, igual al de la fibra de vidrio. Las cámaras de aire pueden ser ventiladas o no ventiladas; las que funcionan mejor son las ventiladas, debido a que eliminan por convección las ganancias de calor rápidamente

hacia el exterior. La Figura B.4 presenta una cámara de aire ventilada localizada en el techo de la edificación.

Figura B.4. Detalle de techo con cámara de aire ventilada. Tomado de [53].



Evitar el uso de techos o cerramientos horizontales de vidrio expuestos al sol

En el trópico, los techos de vidrio deben utilizarse con criterios adecuados, ya que los grandes aportes de calor al interior pueden opacar los beneficios por iluminación y calidad espacial. En el caso de acondicionamiento pasivo se pueden utilizar techos translúcidos, combinados con una adecuada ventilación natural que permita evacuar las ganancias de calor al exterior.

Mitigación de la radiación solar en las paredes

La vegetación colocada en elementos verticales absorbe la radiación solar y sombrea los cerramientos. Al mismo tiempo refresca el aire que circunda la envolvente, mediante la transpiración del vapor de agua. La Figura B.5 presenta un ejemplo de una edificación con vegetación en sus elementos verticales.

En algunos casos los elementos estructurales y/o volumétricos tales como balcones, techos, galerías, atrios, corredores, pantallas y columnas pueden concebirse para actuar adicionalmente como protectores solares, al proyectar sombra sobre las fachadas. Los tonos y materiales oscuros absorben mayor cantidad de calor, por lo cual el revestimiento exterior de las paredes debe ser de una alta reflectancia. Para lograr esto, las pinturas blancas son las más recomendables, pues reflejan entre un 70% y 80% de la radiación solar incidente. Si se requiere combinar materiales o tonos de colores oscuros, úselos en los elementos menos expuestos al sol o aislados térmicamente del exterior, ya sea en corredores, atrios o galerías.

Figura B.5. Ejemplo de uso de la vegetación para la mitigación de la radiación solar en paredes. Tomado de [87].

Mejorar la inercia térmica de los cerramientos

La inercia térmica es la capacidad de un componente para almacenar calor, amortiguar su efecto y transmitirlo con desfase hacia el interior de los ambientes; puede expresarse como débil, media y fuerte. La selección adecuada de los componentes deberá tomar en cuenta la orientación, el horario de uso de la edificación y el tipo de acondicionamiento. Según el mecanismo de inercia térmica, un diseño adecuado deberá seguir las siguientes reglas básicas:

Acondicionamiento pasivo

- En edificaciones de uso diurno y nocturno tales como residencias, es aconsejable utilizar paredes con inercia débil o media, que no acumulen calor en el día y de poco desfase, de forma que no se traslade la onda de calor para las horas de la noche cuando los usuarios estén descansado.
- En edificaciones de uso diurno tales como escuelas, es aconsejable utilizar paredes con inercia media o fuerte, de manera que acumulen calor en el día y retarden la onda de calor para las horas de la noche, cuando se evacuará con la ayuda del movimiento del aire.

Acondicionamiento activo

En edificaciones de uso diurno tales como comercios y oficinas es aconsejable utilizar paredes con inercia media a fuerte, de forma que se amortigüe el comportamiento de la curva de temperatura interior y se traslade el pico de la onda de calor hacia la

noche, cuando el edificio está desocupado. Una estrategia básica complementaria para este caso es la ventilación natural nocturna.

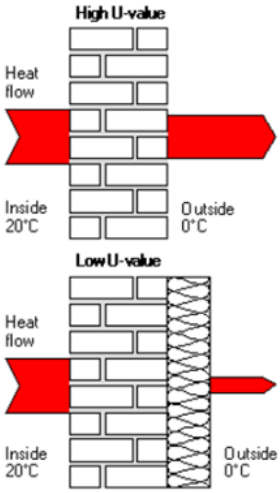
Son materiales con inercia térmica fuerte concretos con espesores mayores a 15 cm; mampostería de arcilla llena, muros en bloques de arena – cemento, suelo – cemento, o fibrocemento con espesores mayores a 25 cm; placas en concreto macizo, espesores mayores a 12 cm, o aligeradas con cavidades de bloque o casetón de guadua; teja de barro o pizarra sobre base de madera y agua en tanques o piletas en placas de cubierta [13].

Uso de materiales aislantes

Los materiales aislantes presentan propiedades termofísicas de baja capacidad calórica y alta resistencia térmica. En paredes con alta insolación se puede amortiguar la temperatura interior utilizando algunos pocos centímetros de aislantes en la cara exterior antes del acabado exterior tal como se muestra en la Figura B.6.

Utilizar barrera radiante contribuye a reirradiar el calor hacia fuera en paredes con alta insolación. Consiste en la colocación de una lámina liviana metálica con bajo poder de emisión y elevado poder reflector (por ejemplo, una hoja de aluminio) en la cara exterior, antes del acabado final. Esta solución debe ser evaluada técnicamente, debido a que en ciertas condiciones la vertiginosa oxidación del metal produce una rápida disminución de su propiedad de reflector de la radiación solar.

Figura B.6. Transferencia de calor en un muro con y sin materiales aislantes. Tomado de [87].

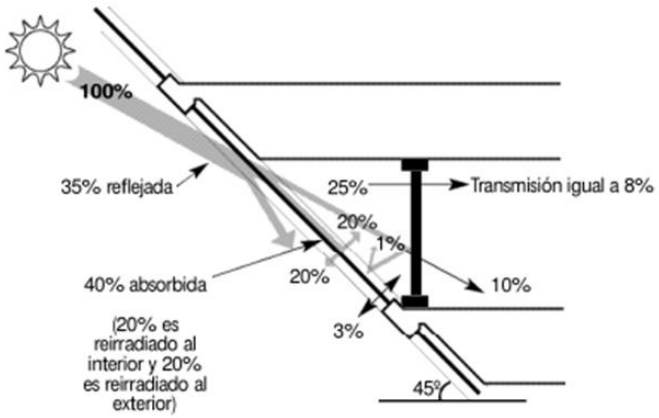


Variación del ángulo de inclinación del acristalamiento en fachadas acristaladas

Las fachadas de vidrios son tecnologías muy costosas y deben ser utilizadas racionalmente en climas cálidos. Dependiendo de la tecnología de vidrio, éste puede dejar pasar o absorber una gran cantidad del calor incidente del sol y transmitirlo hacia el interior. Debería ser utilizado sólo en fachadas norte y eventualmente en fachadas sur. Su uso indiscriminado y sin protecciones solares no es adecuado para países tropicales; provoca altos costos energéticos y económicos por instalación, uso y mantenimiento de equipos de aire acondicionado [53].

Al inclinar los vidrios se atenúa notablemente las irradiaciones solares transmitidas por los cristales. Con ángulos de inclinación de 15° respecto a la vertical (hacia adentro), se obtiene una reducción de las ganancias solares del 14% para ventanas en fachada norte, 28% para orientación este-oeste y 32% para vidrios al sur (ver ejemplo Figura B.7). Para obtener atenuaciones del 50% en las fachadas más críticas (este-oeste), se podrían diseñar fachadas de vidrio (*curtain wall*) con ángulos de 35° respecto a la vertical (135° de la horizontal) [53].

Figura B.7. Efecto de la inclinación en el acristalamiento de las fachadas acristaladas. Tomado de [53].



Fachadas de doble acristalamiento

Entre las innovaciones para reducir la ganancias de calor al interior a través fachadas de vidrio se encuentra el doble vidrio convectivo. Sistema de enfriamiento pasivo que se combina adecuadamente con los sistemas de acondicionamiento activo para disminuir la potencia y el consumo de energía del aire acondicionado. Consiste en una

fachada doble de vidrios ventilada por la parte inferior y superior (como muestra la figura); esto permite que flujos convectivos de aire ascendentes se lleven parte del calor reirradiado.

Uso limitado de ventanas en fachadas oriente y occidente

La radiación solar que entra a través de una ventana sin protecciones solares representa un gran aporte calorífico a los ambientes. Esta radiación es espectralmente muy cercana a la radiación infrarroja, por lo que este calor podría aumentar muy por encima la temperatura interior respecto a la temperatura del aire exterior, debido al denominado efecto invernadero. Los vidrios simples de las ventanas son transparentes a la radiación infrarroja (RI) de onda corta, por lo que ésta es absorbida y reirradiada entre las superficies y objetos interiores en forma de radiación infrarroja (RI) de onda larga. El vidrio resulta opaco para la radiación de onda larga, por lo cual este calor radiante quedará atrapado dentro del ambiente. Este es el mismo proceso de generación de calor que ocurre cuando se deja un carro expuesto al sol con los vidrios cerrados.

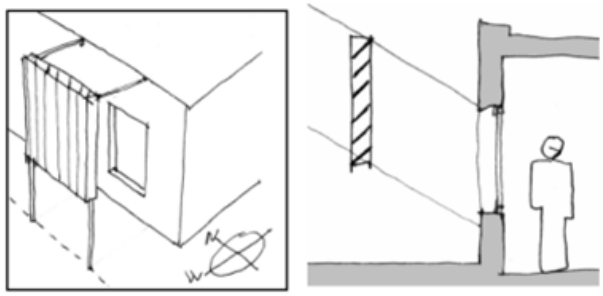
El área total de las aberturas con vidrios afecta de manera determinante la cantidad de luz y calor solar transmitidos hacia el interior de las edificaciones. La mejor técnica para favorecer la calidad térmica y lumínica de los ambientes y para reducir la carga de enfriamiento del sistema de acondicionamiento activo es proteger las ventanas y fachadas de vidrios de la radiación solar. Se debe limitar el área de ventanas y vidrios sin parasoles, especialmente en las fachadas este y oeste; otra opción puede ser utilizar cristales de alta tecnología.

Uso de protecciones solares

Las protecciones solares exteriores son el método más efectivo para reducir las ganancias de calor a través de las aberturas y ventanas. Esta reducción puede estimarse hasta en 80% en el caso de ventanas con vidrios claros simples (ASHRAE 1989). Los protectores solares deben adaptarse a la latitud del sitio, es decir, a la trayectoria y ángulo solar a lo largo del año, así como a la orientación de las ventanas en cada fachada. Estos factores definirán el tipo de protector solar más conveniente;

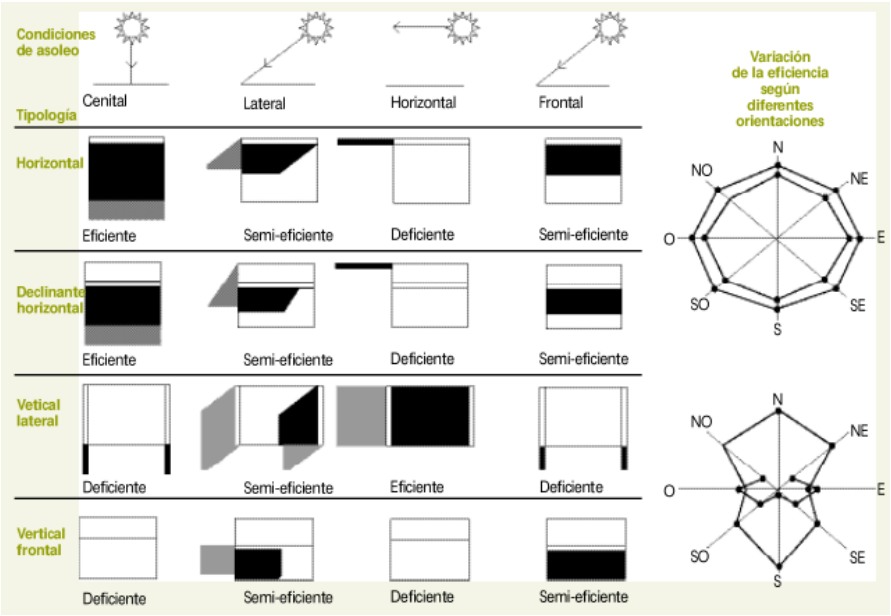
los parasoles fijos más utilizados son horizontales, verticales y frontales. La Figura B.8 presenta un ejemplo de uso de protecciones solares.

Figura B.8. Ejemplo de uso de protecciones solares. Tomado de [88].



Las protecciones horizontales y los aleros de techo funcionan bien para ventanas y aberturas en fachadas norte y sur. El diseño y dimensionamiento preciso de los protectores solares deberá tomar en cuenta la latitud del lugar, la orientación y la altura de la ventana. Existen programas de simulación para evaluar la eficiencia de los protectores en el bloqueo solar y en la disminución de las cargas de enfriamiento en el caso de acondicionamiento activo. En la Figura B.9 se muestra la eficiencia de protectores solares tipo según la posición del sol y la orientación de la fachada.

Figura B.9. Eficiencia de protectores solares tipo según la posición del sol y la orientación de la fachada. Tomada de [53].



Las persianas interiores pueden ofrecer solamente protección parcial ya que reflejan la radiación que ya ha sido admitida dentro de la edificación. Esto aumenta la temperatura del volumen de aire entre el vidriado y la persiana así como del material de las persianas por lo tanto afectando la temperatura de la habitación por la transferencia convectiva y radiativa del calor.

Los elementos de sombreado alcanzan ahorros considerables de energía potencial, por ejemplo cuando sombreados combinados se incorporan en un clima cálido húmedo la reducción de consumo de energía está entre 11% y 17% dependiendo del tipo de edificación.

Orientación de las ventanas

Una técnica tradicional para reducir las ganancias de calor interno y la carga de enfriamiento del sistema de aire acondicionado es aquélla por medio de la cual se reduce el área total de superficies de vidrio claro simple sin protección solar, en especial en las orientaciones este y oeste.

En las zonas cálidas lo ideal es ubicar la mayor área de ventanas o fachadas de vidrios hacia el norte, donde es mínima la radiación directa, o en el sur, en donde pueden ser diseñadas con protecciones solares horizontales para resguardarlas de la radiación solar que incide de noviembre a marzo. Los parasoles en fachadas este y oeste no protegen todo el año los ángulos de incidencia del sol. En este caso, la mejor técnica es no proponer fachadas de vidrio en las fachadas este y oeste.

Ubicación de los espacios refrigerados

Los ambientes como salas de computación, quirófanos, laboratorios, etc., que requieren acondicionamiento con bajas temperaturas, deben estar ubicados en espacios interiores y nunca en fachadas orientadas al oeste; esto con el fin de mitigar las ganancias solares a través de los componentes constructivos.

Relación ventana pared

La ventana y otras áreas de vidriado (incluyendo divisiones y marcos) divididos por el área del muro bruto exterior es llamado Relación de ventana a pared (RVP). Las ventanas generalmente transmiten calor a la edificación en una proporción más alta

que los muros. De esta manera, una edificación con RVP más alta ganará más calor que una edificación con una RVP más baja.

Las ventanas son usualmente la junta más débil en el envolvente de la edificación ya que el vidrio tiene menor resistencia al flujo de calor que otros materiales de construcción. El calor fluye a través de un vidrio transparente 10 veces más rápido de lo que lo hace a través de un muro bien aislado. Mientras las áreas vidriadas son deseables para admitir la radiación solar en climas fríos durante el día, las ventanas en climas cálidos pueden aumentar significativamente las cargas de enfriamiento de los edificios.

En promedio, la proporción de ventana a pared no debe exceder el 40%. Este cálculo debe tomarse para cada elevación desde el exterior de la edificación. El área vidriada se calcula incluyendo parteluces y marcos. Incluye todos los elementos de vidriado, desde paredes con cortinas a ventanas congeladas. La fórmula para calcular es la siguiente:

Área de vidriado / área bruta de pared exterior = RVP (%)

Si RVP es mayor a 40% entonces otras medidas, como el sombreado o el coeficiente de ganancia de calor solar (SHGC) del vidrio debe ser considerado para compensar la pérdida de energía al aumentar el RVP.

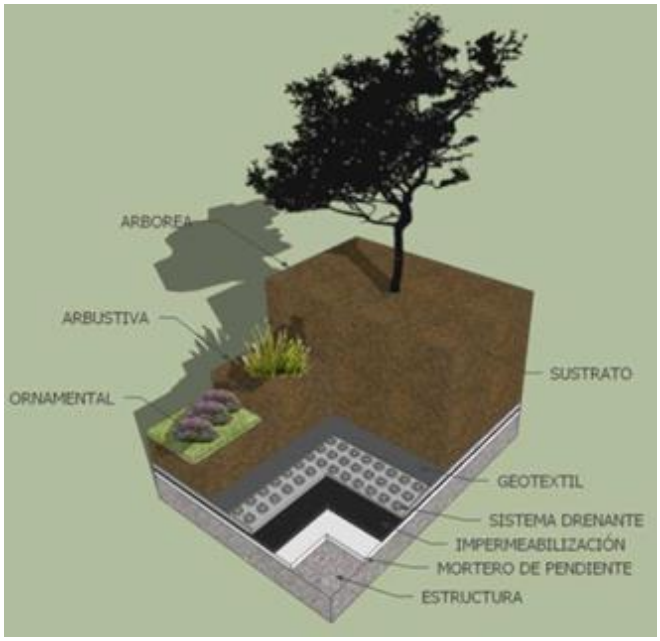
Cubiertas verdes

Las cubiertas verdes son un elemento esencial para disminuir las ganancias solares por radiación en los techos de una edificación, por medio de un complejo sistema que incluye el uso de vegetación para propiciar un mejor confort térmico. A continuación se mencionan aspectos importantes de las mismas. Dentro de los beneficios ofrecidos por las cubiertas verdes se listan la regulación del efecto de isla de calor urbano, el mejoramiento de la calidad de aire, mejoramiento de la gestión de aguas lluvias y una reducción en el consumo de energía eléctrica asociado a aires acondicionados [82].

Para el caso de edificios emplazados en Bucaramanga se estima que un techo verde puede reducir la temperatura interior de los espacios cercanos a la azotea de 3°C a 5°C durante el día, lo que en consecuencia generará ahorros energéticos entre el

25% y el 50% debido a un menor uso de aires acondicionados. La Figura B.10 presenta la composición de una cubierta verde. Fundamentalmente una cubierta verde está compuesta por una capa vegetal, un suelo de cultivo y un conjunto de capas protectoras, de acuerdo al caso, se tendrán más o menos membranas. El espesor de la aplicación generalmente está entre 10 cm y 30 cm; la Tabla B.3 relaciona las características de cada una de las capas que en general componen una cubierta verde [82].

Figura B.10. Esquema de un techo verde.



Para la implementación de cubiertas verdes en las edificaciones se hace necesario considerar algunas adaptaciones en el diseño o en la construcción tales como un soporte estructural para la carga adicional, un sistema de irrigación, un sistema de captación de aguas lluvias, unas condiciones de seguridad para el personal durante su construcción, uso y mantenimiento, que para su construcción, representan una inversión adicional [82].

Tabla B.3. Capas características de una cubierta verde. Adaptado de [82].

Capa	Descripción
Vegetación	El área de las hojas es determinante del nivel de aislamiento térmico, ya que a mayor sombra generada sobre el sustrato menor será el calor transmitido a la estructura.

Sustrato o suelo de cultivo	Se debe caracterizar por ser liviano, nutritivo y de alta expectativa de vida. El espesor del sustrato está relacionado con la profundidad que puedan alcanzar las raíces de las plantas y del nivel de aislamiento térmico que se desee. Define el peso de la aplicación (m), el cual se calcula a partir del área (A), el espesor (h) y la densidad de la tierra (ρ). La densidad del suelo de cultivo varía básicamente según el nivel de humedad, por lo que oscila entre los 700 kg/m3 y 1000 kg/m3 [82].
Drenaje	Permite controlar el nivel de agua lluvia y de riego del sustrato, a partir del material granular (grava) y de una estructura reticular plástica liviana [82].
Barrera anti-raíz	Evita que las raíces de la vegetación sembrada se extienda hasta las capa del impermeabilizante, lo cual podría ocasionar perforaciones en ésta [82].
Impermeabilización	Evita el contacto del agua con la placa de hormigón y con ello problemas de humedad, se realiza a partir de una tela PVC o de una solución asfáltica (aplicación líquida), la primera estrategia es la más común debido a la no necesidad de aditivos [82].

ESTRATEGIAS PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA VENTILACIÓN NATURAL

La ventilación natural es el proceso de intercambio de aire del interior de una edificación por aire fresco del exterior, sin el uso de equipos mecánicos que consuman energía tales como acondicionadores de aire o ventiladores. El movimiento de aire se origina por diferencia de presiones, la cual tiene dos fuentes: gradiente de temperaturas o efecto dinámico del viento al chocar contra la edificación.

En regiones tropicales, el movimiento del aire de origen térmico puede ser despreciable, dada la poca diferencia de temperatura entre el aire interior y exterior. Por el contrario, la fuerza dinámica provee mayor velocidad y remoción del aire a los ambientes interiores, factor de suma importancia para el confort térmico en climas cálidos.

La ventilación natural puede reducir o eliminar la necesidad del aire acondicionado en los espacios interiores cuando es utilizada en combinación con el aislamiento, la masa térmica y las protecciones solares.

Para maximizar las oportunidades de ventilar naturalmente una edificación debe asegurarse un irrestricto acceso a los vientos exteriores. La velocidad del aire en un ambiente está condicionado por la velocidad del viento incidente y de los campos de

presión que se generan alrededor de la edificación, los cuales están determinados por la implantación y forma de la edificación, la permeabilidad de las fachadas y la distribución interior de los ambientes.

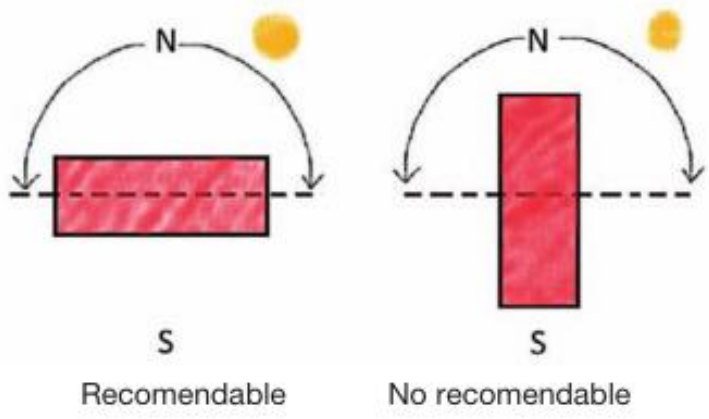
El comportamiento del aire alrededor y dentro de la edificación está regido por los siguientes principios:

- El movimiento del aire dentro de las edificaciones se basa en el principio básico del “equilibrio de presiones” entre los ambientes. En la medida en que se mantengan una diferencia de presiones, se produce un proceso continuo de circulación del aire.
- Al chocar con la edificación el viento provoca diferencias de presión entre los lados. De esta manera, el aire se desplaza desde la zona de barlovento (presión positiva) a la zona de sotavento (presión negativa) a través de las aberturas.
- Una forma de la edificación que produzca mayores perturbaciones en el movimiento del viento creara mayores diferencias de presión.
- El aire tiende a entrar por las aberturas de cara a la incidencia del viento y salir por las aberturas restantes, en función de las dimensiones, de la ubicación y del tipo de ventana.
- Si un ambiente tiene sólo un orificio hacia el exterior, allí se crea una zona neutral donde el aire entra por arriba y sale por debajo, con escasa renovación del mismo.
- Las aberturas deben orientarse adecuadamente a fin de que promuevan la ventilación cruzada. En el interior de los ambientes.

Orientación de la edificación

Utilice formas abiertas, alargadas o segmentadas, ubicadas según un ángulo ligero en relación a los vientos principales, teniendo cuidado de orientar las fachadas más estrechas hacia el este y el oeste tal como se muestra en la Figura B.11. Esta disposición reducirá las ganancias de calor solar y proporcionara mayores oportunidades de ventilación cruzada.

Figura B.11. Orientación de la edificación. Tomada de [89].



Manejo de la volumetría de la edificación

Cuando la orientación solar óptima de la edificación plantea un conflicto con la orientación optima del viento, se puede utilizar el juego de volúmenes en las fachadas para orientar la trayectoria del viento a través de la edificación. Esto es de especial importancia en el trópico, donde con frecuencia los vientos predominantes vienen del este, en este caso se aconseja orientación norte –sur para las fachadas de mayor área.

La configuración externa de la edificación puede reforzar las diferencias de presión entre barlovento y sotavento, lo cual, combinado con la permeabilidad de las fachadas, impulsará un mayor flujo de aire hacia el interior de los ambientes. En una fachada con ventanas, orientadas 45° en relación al viento, la colocación de una pared o volumen saliente al final puede duplicar la presión positiva del viento. Si por el contrario se coloca la pared o volumen antes de las ventanas, se reduce la presión frente a estás y se disminuye el caudal hacia el interior.

El ángulo de inclinación y la orientación de las aguas de un techo pueden emplearse para desviar la trayectoria original del viento, y de esta manera aprovechar mejor su fuerza dinámica para ventilar los ambientes.

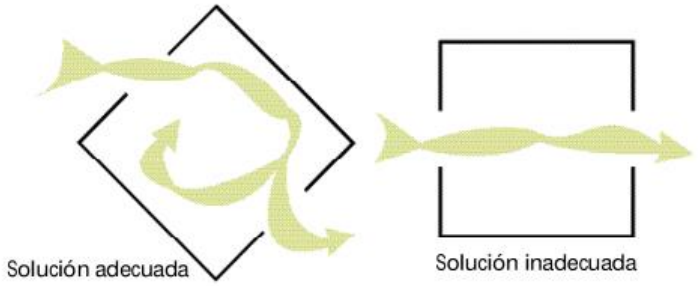
Ubicación de las aberturas en los espacios

Una adecuada ventilación natural requiere al menos de dos aberturas efectivas en cada espacio para propiciar la ventilación cruzada. Las configuraciones más comunes

de la ubicación de las aberturas son: aberturas en paredes adyacentes, aberturas en paredes opuestas y aberturas en la misma pared cuando el espacio posee una sola pared exterior. En el caso de tener ventilación cruzada, se recomienda diseñar la ventana de entrada del flujo de aire ligeramente más pequeña que la de salida. En estos casos se considera que la proporción correcta es 1:1,25 [53].

Los espacios caracterizados por producción interna de calor y humedad, tales como cocina, lavaderos y salas de baño, deben estar bien ventilados y ubicados aguas abajo del flujo del viento. De igual manera se recomienda orientar las fachadas de los ambientes con aberturas situadas en paredes opuestas, 45° respecto a la dirección predominante del viento. La Figura B.12 ejemplifica esta situación.

Figura B.12. Orientación adecuada de las fachadas en relación a la dirección del viento. Tomado de [53].



Ubicación de las aberturas

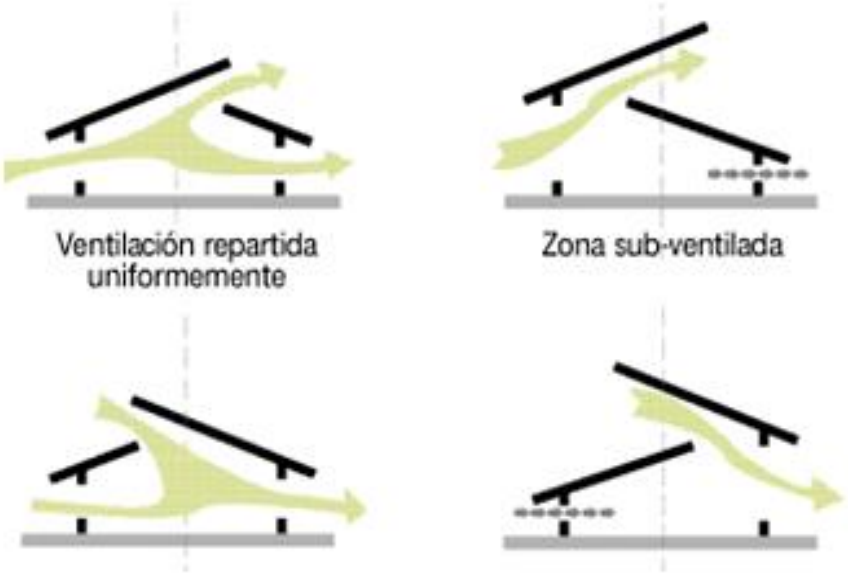
Se debe asegurar que los ocupantes de un espacio disfruten del movimiento del aire y de los intercambios de calor que se generan entre la piel y el aire en renovación. La ubicación de las aberturas de entrada afecta directamente el comportamiento del aire. Las aberturas de salida no afectan significativamente este comportamiento. Las aberturas ubicadas a gran altura producen un movimiento del aire por encima del cuerpo humano.

Aberturas en techos

Las aberturas podrán ser para entrada de aire a la edificación o para salida de éste desde los ambientes al exterior, permitiendo así la ventilación transversal. Ahora bien, la ubicación de la abertura en techo, respecto a la volumetría y distribución interior,

será clave para aumentar la eficiencia de la ventilación natural, tal como se demuestra en la Figura B.13.

Figura B.13. Influencia de la ubicación de las aberturas en techos. Tomado de [53].



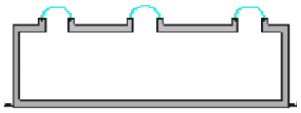
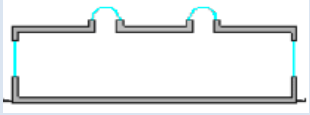
ESTRATEGIAS PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA ILUMINACIÓN NATURAL

Las características lumínicas del cielo están determinadas por la latitud, la altitud y las condiciones climáticas de cada región. La radiación solar índice de forma directa en las fachadas orientadas en el eje este-oeste, y de manera difusa, debido a las múltiples reflexiones de luz en la bóveda celeste en las otras orientaciones.

En los países tropicales, el criterio de diseño prevaleciente debe estar orientados a un buen aprovechamiento de la abundante luz natural con un buen control de la radiación térmica, y en el caso de acondicionamiento activo, menor consumo de energía de enfriamiento.

En la iluminación natural de edificaciones se utilizan básicamente tres sistemas: iluminación natural, iluminación cenital, iluminación combinada [90]; en la Tabla B.4, se relacionan los sistemas de iluminación natural con sus características más representativas.

Tabla B.4. Sistemas de iluminación natural.

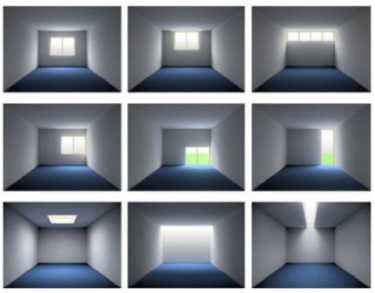
Sistema	Descripción	Ejemplo
Iluminación lateral	La luz ingresa por una abertura ubicada en un muro lateral, la iluminancia de mejor calidad se ubica en el plano de trabajo cercano a la abertura, aunque también se presentan aportes a la iluminación general del espacio. La cantidad y distribución de la luz que ingresa en el local depende de la orientación del muro donde se ubica la abertura [91]	
Iluminación cenital	Las aberturas son ubicadas en la parte superior del local, se utiliza generalmente cuando se proyecta con un escenario predominante cielo cubierto [91] .	
Iluminación combinada	En este tipo de iluminación existen aberturas en los muros laterales y en la cubierta superior del local [91].	

Posición de las aberturas

Según la posición del dispositivo captador de luz, este puede ser de tipo luz techo (claraboya), unilateral (una fachada) o multilateral (dos o más fachadas). Lo cual indica que será parte de la envolvente de la edificación, por lo cual debe concebirse desde el diseño arquitectónico [82].

La parte superior de los edificios puede ser aprovechada a partir de atrios y/o patios interiores para la iluminación de espacios inferiores. Las estrategias unilaterales son limitadas para la distribución de luz, sobre todo en condiciones de cielo nublado; por tal razón, es conveniente una iluminación desde varias direcciones.

Figura B.14. Diferentes posiciones para dispositivos captadores de luz. Tomado de [88].



Las estrategias más comunes para incrementar el nivel de iluminación en el espacio son el uso de ventanas en diferentes paredes y el uso combinado de ventanas y aberturas en la parte superior de la pared; cuanto más alta está una ventana mayor es la profundidad de penetración de luz natural, lo que produce una mejor distribución en la sala iluminada. Una ventana en posición central produce una mejor distribución de luz en el interior, mientras que una ventana en esquina provoca menos deslumbramiento [92]. En la Figura B.14, se presentan las distintas posiciones empleadas para la ubicación de los huecos de luz, así como la distribución de iluminación natural obtenida correspondiente.

Organización de los ambientes interiores

Se recomienda organizar los ambientes anteriores de forma que se promueva la iluminación cenital a través de atrios, patios interiores o pozos de iluminación. De esta manera se logra reducir el consumo de energía por iluminación artificial. Evite techar los patios con cerramientos transparentes y sin ventilar, debido a que las ganancias por radiación solar anulan las ventajas de la iluminación natural y desmejoran la calidad térmica por lo que se requerirá de mayor potencia de sistemas de aire acondicionado en caso de acondicionamiento activo.

Acabados interiores de buena reflexión

Los colores de los acabados interiores pueden afectar la distribución de la luz. Los colores claros y brillantes reflejan mejor la luz que los colores oscuros o mates, y mejoran su distribución en el espacio (ver Tabla B.5). En general los colores de los techos y paredes tienen una mayor influencia en la distribución de la luz que los del piso. Debe tenerse cuidado con el deslumbramiento.

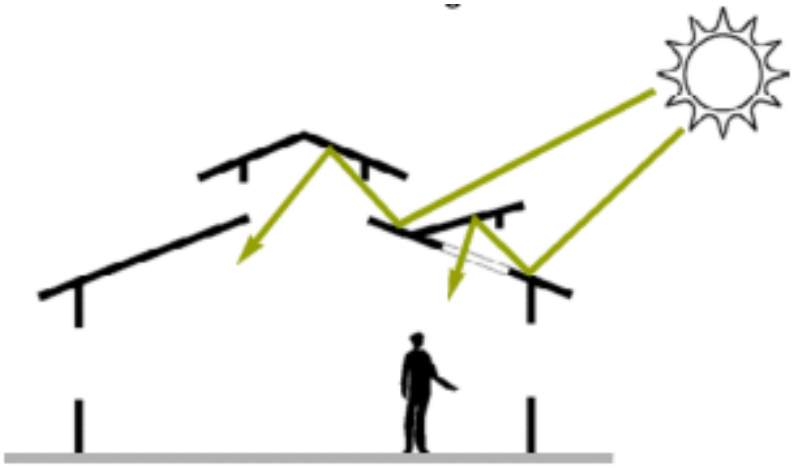
Tabla B.5. Porcentaje de reflectividad de paredes, pisos y techos según reflectividad del color. Adaptado de [53].

Paredes	Techos	Pisos	
50 %	30 %	20 %	Colores semioscuros
80 %	60 %	40%	Colores claros

Aberturas en los techos

A través de aberturas en techo se pueden iluminar en forma natural los ambientes interiores. Se deben controlar las ganancias de calor con las propiedades termofísicas de los vidrios. Para aumentar la eficiencia de la iluminación natural se pueden utilizar superficies reflectivas, tal como se muestra en la Figura B.15.

Figura B.15. Aprovechamiento de la iluminación natural a través de aberturas en techo. Tomado de [53].



Las claraboyas o cúpulas de techo pueden ser una vía para brindar iluminación natural al interior de los ambientes. Sin embargo, en el trópico estos dispositivos pueden ser causa de una gran ganancia de calor y de luz deslumbrante. Existen diferentes tipos de cúpulas que permiten minimizar estos efectos.

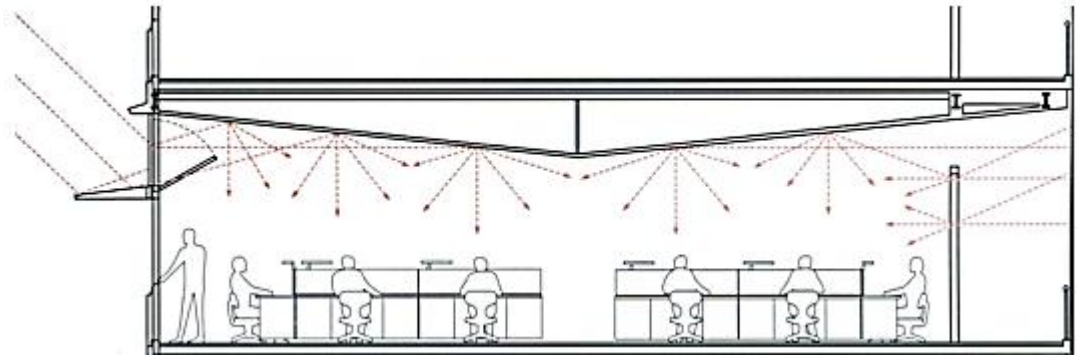
Las cúpulas de iluminación con dispositivos para ventilación permiten minimizar las ganancias de calor al contribuir a evacuar el aire caliente. Sólo deben ser utilizadas en caso de acondicionamiento pasivo de ambientes interiores. Para que funcionen adecuadamente, la instalación de la cúpula debe ser ubicada de forma tal que la brisa del viento contribuya al movimiento del aire interior, evacuando el aire caliente hacia el exterior. Es posible que se generen sobrecalentamientos y deslumbramientos a través de claraboyas y cúpulas de techo expuestas al sol, por tal motivo se recomienda seleccionar las características apropiadas de vidrio y área de las aberturas en el techo.

Bandejas de luz

Una bandeja de luz es un reflector horizontal empleado para conducir la luz natural hacia el interior de una edificación, la cual puede además servir como protector solar de ventanas y paredes, tal como se muestra en la Figura B.16. Una bandeja de luz en una ventana reduce las ganancias de calor a través de la sección inferior y permite el paso de la luz reflejada a través de la superior.

Si se integra este concepto al diseño de las instalaciones se logra reducir parcialmente el consumo de energía, debido a la iluminación artificial y al sistema de aire acondicionado de la edificación.

Figura B.16. Bandejas de luz. Tomado de [88].



Control de la iluminación natural

Hay momentos en los que los usuarios de una edificación continúan prendiendo las luces a pesar de tener luz de día adecuada. Los controladores fotoeléctricos detectan la cantidad de luz día disponible dentro del edificio y apagan las luces si es necesario lo que es conocido por mejorar la eficiencia energética de las edificaciones (ver Figura B.17).

Este tipo de sensores están ubicados en el perímetro de una habitación cerca de una ventana/área vidriada. Allí monitorean los niveles de luz día y apagarán automáticamente los accesorios de luz artificial del perímetro durante los momentos con niveles suficientes de luz día. Esta medida resulta en ahorro de electricidad significativo.

Figura B.17. Fotocelda dimerizable. Tomado de [87].

Es aconsejable mantener el mínimo de densidad de potencia de iluminación requerido por la normativa local para todas las diferentes actividades y espacios. El control de la luz día mostró gran ahorro de energía en todo los tipos de edificaciones. Sin embargo los sensores fotoeléctricos son más difíciles de implementar en viviendas y por lo tanto se recomiendan mejor en oficinas, hospitales y educativos. En estos tipos de edificaciones el ahorro potencial de energía es alrededor del 15%.

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA SOLAR

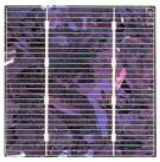
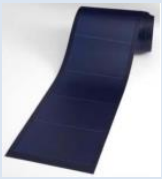
La radiación solar que llega todos los días a nuestro planeta contiene una cantidad de energía diez mil veces superior a la que se consume a diario en todos los lugares de la superficie terrestre. La radiación solar de Bucaramanga es en promedio 4,9 [kWh/m^2/día], lo que significa un abastecimiento de energía solar anual de 1,82 [MWh/m^2]. Tal nivel se debe a la posición geográfica y condiciones climatológicas en sitio [82].

El principal beneficio derivado de la utilización de la energía solar es la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente CO_2. Cuando se recurre al empleo de mecanismos para captar y aprovechar la energía del sol y transformarla en una energía útil (calor o electricidad) se habla de energía activa. Dentro de los sistemas de aprovechamiento de energía solar activa se distinguen dos tipos: los que se destinan a la producción de calor o sistemas solares térmicos, y los que se utilizan para la producción de electricidad, los sistemas solares fotovoltaicos [55].

Energía solar fotovoltaica

Los módulos fotovoltaicos están formados por un conjunto de células, interconectadas entre sí, que producen electricidad cuando incide sobre ellas la luz solar. Vienen caracterizadas por la potencia pico, que es la potencia máxima que podrían entregar en unas determinadas condiciones de alta irradiación y baja temperatura. En la actualidad existen disponibles en el mercado tres tipos de módulos, descritos en la Tabla B.6.

Tabla B.6. Tipos de módulos fotovoltaicos. Adaptado de [93].

Tipo de módulo	Descripción	Imagen
Silicio Monocristalino	Están constituidos por células fotovoltaicas que han cristalizado en una sola pieza, siendo los de mayor eficiencia.	
Silicio Policristalino	Las células policristalinas forman cristales desordenados, lo que baja ligeramente el rendimiento.	
Amorfos o capas fina	Esta tecnología se basa en rociar una pequeña cantidad de una sustancia absorbente solar sobre una capa que puede ser rígida o flexible. Estos módulos son menos eficientes que los cristalinos, y sufren una importante degradación inicial. A cambio, trabajan mejor a altas temperaturas, aprovechan mejor la radiación difusa y ofrecen mayor flexibilidad para la integración arquitectónica.	

Los sistemas fotovoltaicos pueden ser instalados en cubiertas, integrados a la fachada de las edificaciones o ser usados como protecciones solares. Existen principalmente dos tipos de instalaciones: las de conexión a red, donde la energía que se produce se utiliza íntegramente para la venta a la red eléctrica de distribución, y aisladas de red, que se utilizan para auto consumo, ya sea una vivienda aislada, una estación repetidora de telecomunicación, bombeo para riego, etc [94].

Algunos de los beneficios de la instalación de paneles solares fotovoltaicos son [95]:

- Autogeneración de energía que permite tener una reducción en los costos, por el concepto del pago del consumo ordinario de energía eléctrica de la red.
- Posterior al periodo de recuperación de la inversión, se obtienen ingresos ya sea por el ahorro ya establecido o por la venta de kWh, inyectables a la red nacional según lo determina la Ley 1715.
- Incrementa la eficiencia energética de los sistemas de eficiencia pasiva y mecánico del aire, por la sombra que hacen estos sistemas, una vez se han instalado.
- Los sistemas fotovoltaicos tienen una vida útil de 25 años, requiriendo ocasionalmente del cambio de inversores cada 8 o 10 años, dependiendo de la calidad de los equipos y de los mantenimientos realizados.

Para el cálculo de una instalación fotovoltaica de deben tener en cuenta los siguientes pasos: cálculos de los consumos básicos, estudio del potencial solar del sitio, estimación del número de paneles necesarios, cálculo de las baterías, y selección del convertidor y regulador.

Energía Solar térmica

La energía solar térmica consiste en el aprovechamiento de la energía procedente del sol para transferirla a un medio portador de calor, generalmente agua o aire. La tecnología actual permite también calentar agua con calor solar hasta producir vapor y posteriormente obtener energía eléctrica [94].

La principal aplicación de la energía solar térmica es la producción de agua caliente sanitaria (ACS) para el sector doméstico y de servicios. Otras de las aplicaciones extendidas es la del calentamiento del agua de piscinas.

Las instalaciones solares térmicas son generalmente de color oscuro para facilitar la captación de la máxima radiación, calentando un fluido que transporta hasta un acumulador de energía, en este caso un depósito de agua, donde la energía queda almacenada hasta su utilización. Para evitar que el calor captado se disipe, es necesario aislar convenientemente el colector, el acumulador de energía y las redes de distribución [93].

La demanda de agua caliente de las edificaciones como hoteles, hospitales y edificaciones de viviendas, especialmente en climas fríos es muy alta. Instalar calentadores solares de agua puede reducir el consumo de energía entre 5% y 25%.

ESTRATEGIAS PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE LOS SISTEMAS DE LA EDIFICACIÓN

Existe un grupo importante de estrategias que propician el ahorro energético a través de la mejora de la eficiencia energética de diferentes elementos asociados los sistemas y equipos más representativos de la edificación.

Uso de equipos eléctricos eficientes

Hoy en día en todas las edificaciones residenciales existe un gran número de equipos eléctricos consumidores de energía. Los consumos unitarios de cada uno de estos equipos suelen ser relativamente bajos, pero considerados en conjunto, y dado el gran número de horas que están en funcionamiento, supone una parte importante de la factura eléctrica [55]

Electrodomésticos

Se recomienda considerar el consumo energético de los equipos en el momento de la compra, y adquirir electrodomésticos con etiquetas clase A, que pueden consumir hasta un 60% menos energía que los modelos convencionales.

Equipos ofimáticos

En relación con equipos ofimáticos se recomienda que estos lleven la etiqueta *Energy Star*. Este sello se puede encontrar en ordenadores, monitores, fotocopiadoras, impresoras, faxes y escáneres entre otras, y garantiza que los equipos que la llevan cumplen con unos requisitos mínimos de eficiencia energética. Transcurrido un tiempo sin usarse, pasan a un estado de reposo en el que el consumo es como mucho un 15% del normal. Se pueden obtener ahorros superiores al 50% de energía eléctrica empleada en los equipos eléctricos.

Ascensores

La mayor parte del consumo energético de los ascensores se produce durante los arranques, debido a los elevados picos de potencia demandada, que ascienden a tres

o cuatro veces el valor de la potencia nominal. Estos equipos, además pueden ser los causantes de consumo de energía reactiva, que puede provocar caídas de tensión y perdidas de potencia de la instalación eléctrica. La energía reactiva se encuentra penalizada en la factura eléctrica por la compañía distribuidora.

El consumo energético de un ascensor depende de muchos factores: tipo de tecnología empleada, régimen de uso y horas de funcionamiento. La eficiencia energética de estos sistemas n es generalmente un criterio determinantes a la hora de su elección, y en muchos casos, renovar los equipos suelen suponer una inversión demasiado elevada [55].

Ascensores de última generación son eléctricos de tracción directa con máquinas más pequeñas, evitando así elementos reductores como engranajes, rodamientos aceites, etc. Este tipo de ascensores suponen un importante cambio tecnológico en lo que se refiere a consumo y eficiencia energética: estos consumen entre un 25 y un 40% menos que los ascensores eléctricos convencionales y en torno a un 60% menos que los ascensores hidráulicos. De igual manera generan menos ruido [55].

El potencial de ahorro depende mucho del ascensor y el uso que se haga de él. En edificios grandes se pueden obtener ahorros hasta el 20% de la energía y del 30% en la factura eléctrica.

Integración de la iluminación natural con artificial

El diseño y la ubicación adecuada de las ventanas y aberturas en los ambientes permiten el acceso a la iluminación natural, controlando al mismo tiempo las ganancias de calor solar. En el diseño y la construcción de edificios debe estimularse una eficiente iluminación natural complementada con luz artificial, sobre todo en espacios de ocupación diurna como viviendas, oficinas y escuelas. El objetivo es obtener los niveles requeridos para uso diurno con iluminación natural o combinando iluminación artificial y natural (iluminación mixta) a través del uso de fotoceldas y luminarias de tipo dimerizable.

Sistemas de iluminación zonificados

Las luminarias se ubican sobre un área destinada a alguna tarea específica, por lo que generan un nivel de iluminación menor en las zonas circundantes y/o en las áreas de circulación. Pueden utilizarse lámparas de pared y/o de techo para el alumbrado local del área de trabajo. Esta nueva tendencia de iluminación localizada por tarea es conveniente cuando no se requiere un nivel de iluminación homogéneo para todo el ambiente, además de dotar al espacio de mayor contraste y calidad lumínica.

Iluminación eficiente

La iluminación de energía eficiente es aquella que tiene una mayor densidad de potencia de luz (LPD por sus siglas en inglés). La LPD es el total de potencia eléctrica usada por las luces instaladas en la edificación dividido por el área total del edificio. Para un nivel de iluminación dado, entre más bajo el LPD más eficiente es la edificación. Es directamente dependiente del uso de lámparas de energía eficiente.

Los beneficios específicos del uso de equipos de iluminación de energía eficiente son ahorro de energía e iluminación mejorada. Iluminación de energía eficiente puede reducir el consumo de energía entre 5% y 25% dependiendo del tipo de edificación, siendo las edificaciones los que muestran los mayores ahorros. Entre las lámpara de mayor ahorro se encuentran la lámparas fluorescentes compactas, lámparas T5 y T8 y la lámparas tipo LED.

Economizadores de aire

Los economizadores de aire son equipos instalados en los aires acondicionados que permiten la entrada de aire fresco al sistema cuando las temperaturas del ambiente externo coinciden con los niveles de temperatura interior deseada.

Los economizadores consisten en compuertas, sensores, solenoides y aparatos lógicos que determinan cuánto aire exterior se debe llevar dentro del edificio. En las condiciones correctas, los sensores y controles apagan los compresores y dejan entrar el aire exterior a través de persianas economizadoras. Un economizador que opera apropiadamente puede reducir la energía hasta un total de 6% del total del consumo de energía de la edificación, dependiendo del clima local y de las cargas internas de enfriamiento.

Este equipo funciona en climas templados y fríos ya que las temperaturas externas están dentro de la zona de confort la mayor parte del día. Sin embargo esto solamente aplica en edificaciones con aire acondicionado donde se puede alcanzar una reducción en el uso de energía y según el contenido de humedad en el aire.

Coeficiente de desempeño

Los aires acondicionados son máquinas que remueven calor de un líquido vía compresión de vapor y ciclos de absorción de refrigeración. Este líquido puede entonces circular a través del intercambiador de calor para enfriar el aire en los espacios requeridos.

La selección del equipo de enfriamiento correcto ayuda a reducir la energía necesaria para el enfriamiento. El estudio de energía en la construcción colombiana muestra que tener COP altos para equipos de enfriamiento resulta en ahorros más altos de energía.

El aire acondicionado representa más del 50% del total de los costos de electricidad en una edificación climatizada. Por lo tanto la eficiencia de un sistema HVAC es de gran importancia. El corazón del sistema HVAC es el equipo de enfriamiento (compresor) y como tal es importante procurar un equipo de enfriamiento eficiente.

Aumentar el COP 3.0 (oficina de caso base) a 4.5 da un ahorro de energía de 15%. Mientras el equipo unitario o en paquete, aumentando el COP de 3.0 (edificio de vivienda de caso base) a 3.5 da un ahorro de energía del 7% de la totalidad del consumo de energía del edificio. Por esta razón usar equipos con un COP más alto reducirá el consumo de energía significativamente.

Variadores de velocidad

Un variador de velocidad (VSD por sus siglas en inglés) es un aparato electrónico que controla la velocidad rotacional de una pieza de un equipo impulsado por un motor. El control de velocidad se obtiene al ajustar la frecuencia del voltaje aplicado al motor. Este enfoque normalmente ahorra energía para aplicaciones de carga variable. Tener variadores de velocidad para ventiladores de torres de enfriamiento ayuda a reducir el consumo de energía con cargas variables y condiciones ambientales moderadas.

Simulaciones de energía muestran que equipos con variadores de velocidad pueden reducir entre 1% y 5% del total de la energía.

Los beneficios de tener variadores de velocidad incluyen:

- Maximizar el ahorro de energía
- Proveer un control de la temperatura del agua que vuelve al condensador
- Inicios suaves, reduce el estrés en sistema de control del ventilador
- Control de ruido
- Diagnostico incorporado y mayor capacidad de control.

Mejoramiento del factor de potencia

El factor de potencia es un indicador sobre el correcto aprovechamiento de la energía, de forma general es la cantidad de energía que se ha convertido en trabajo. El factor de potencia puede tomar valores entre 0 y 1, donde 1 es el valor ideal, esto indica que toda la energía consumida por los aparatos ha sido transformada en trabajo.

Por el contrario un factor de potencia menor a la unidad significa mayor consumo de energía necesario para producir un trabajo útil.

La mayoría de los equipos eléctricos utilizan potencia activa o real que es la que hace el trabajo real y utilizan también la potencia reactiva, la cual no produce un trabajo físico directo en los equipos. Un alto consumo de energía puede producirse como consecuencia principalmente de:

- Un gran número de motores.
- Presencia de equipos de refrigeración y aire acondicionado.
- Una sub-utilización de la capacidad instalada en equipos electromecánicos, por una mala planificación y operación del sistema eléctrico de la industria.
- Un mal estado físico de la red eléctrica y de los equipos de la industria

La corrección del factor de potencia se realiza mediante la compensación por bancos de condensadores y/o filtros de armónicos que son instalados junto a la cargas problemáticas.

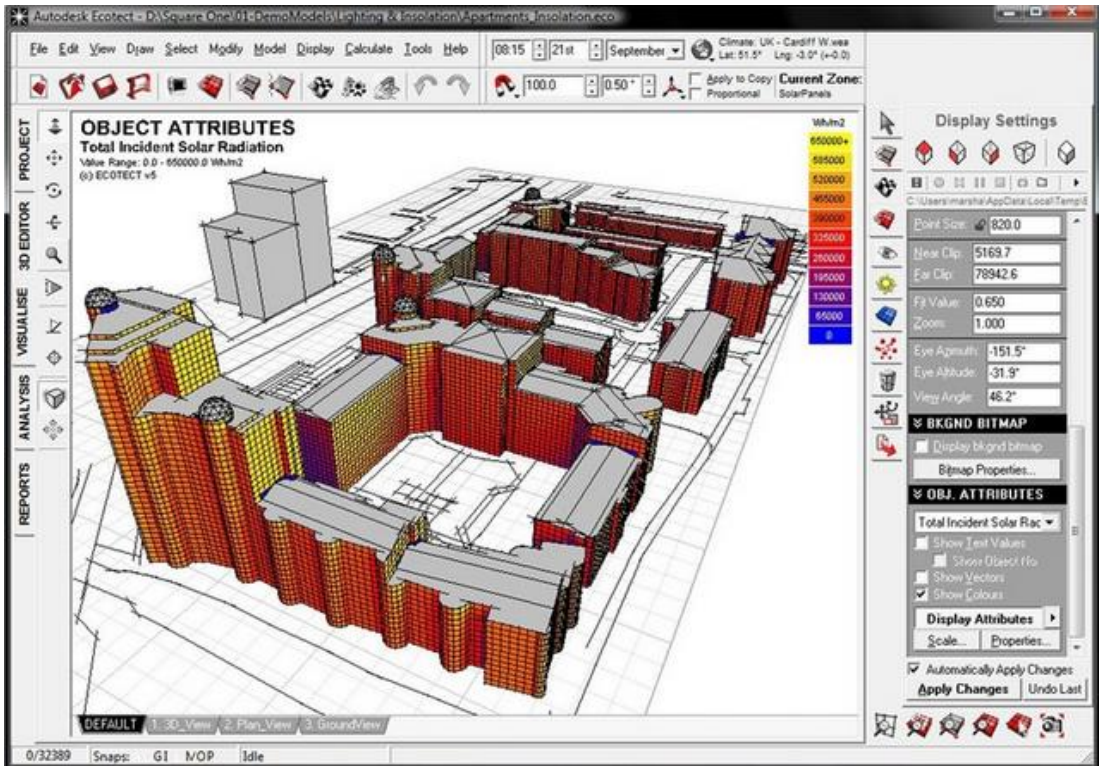
ANEXO C. DESCRIPCIÓN DE LAS HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN ENERGÉTICAPRESELECCIONADAS

Este anexo describe las principales características de las herramientas de simulación energética preseleccionadas: Ecotect, EnergyPlus, eQUEST y DesignBuilder.

Ecotect

Es una herramienta de análisis y diseño arquitectónico muy visual que vincula un modelado 3D con un amplio rango de análisis de rendimiento. Su interfaz gráfica es mostrada en la Figura C.1.

Figura C1. Interfaz de usuario de Ecotect. Tomado de [96].



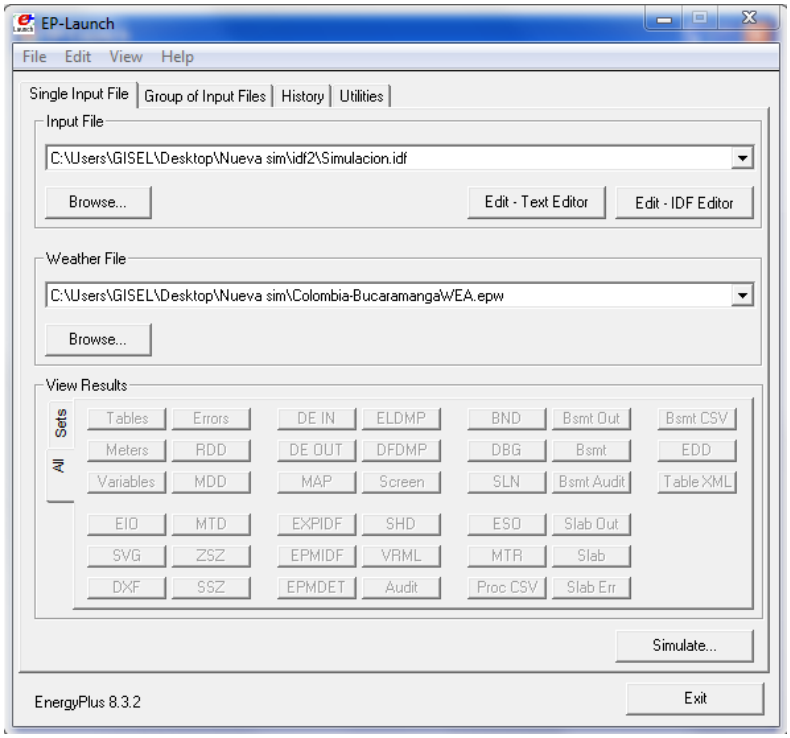
Esta herramienta permite realizar análisis energéticos, de iluminación natural, sombreado, acústica y algunos aspectos de costos. Ecotect está enfocada hacia las primeras etapas de diseño de las edificaciones [27]. Los resultados pueden visualizarse en gráficos estándar e informes basados en tablas. Estos también pueden mostrarse a través de mapas sobre las distintas superficies del edificio, o

visualizaciones de tipo volumétricas [27].Los campos típicos de aplicación de esta herramienta son el análisis energético de todo el edificio, análisis del rendimiento térmico, consumo y evaluación de costos de agua, análisis de la radiación solar, estudios de iluminación solar, sombras y reflejos [97].

EnergyPlus

Es una herramienta de simulación energética con características de BLAST y DOE-2.1E, posee entradas y salidas textuales, y una interfaz de usuario poco amigable tal como se muestra en la Figura C.2. EnergyPlus se basa en un enfoque integrado (cargas y sistemas de simulación) lo que conduce a predicciones más exactas de las temperaturas en los espacios y por lo tanto una mejor estimación de varios de los parámetros resultantes, como el confort térmico [27].

Figura C.2. Interfaz de usuario de EnergyPlus. Tomado de [98].



Los resultados de EnergyPlus son más precisos y fiables que los DOE-2 para la mayoría de los edificios y sistemas simulados. EnergyPlus implementa el método de carga espacial preferido por la ASHARE. Éste se basa en ecuaciones termodinámicas y es más preciso que el empleado en el motor de simulación DOE-2. Sin embargo, la complejidad de sus algoritmos aumenta el tiempo de simulación [99].

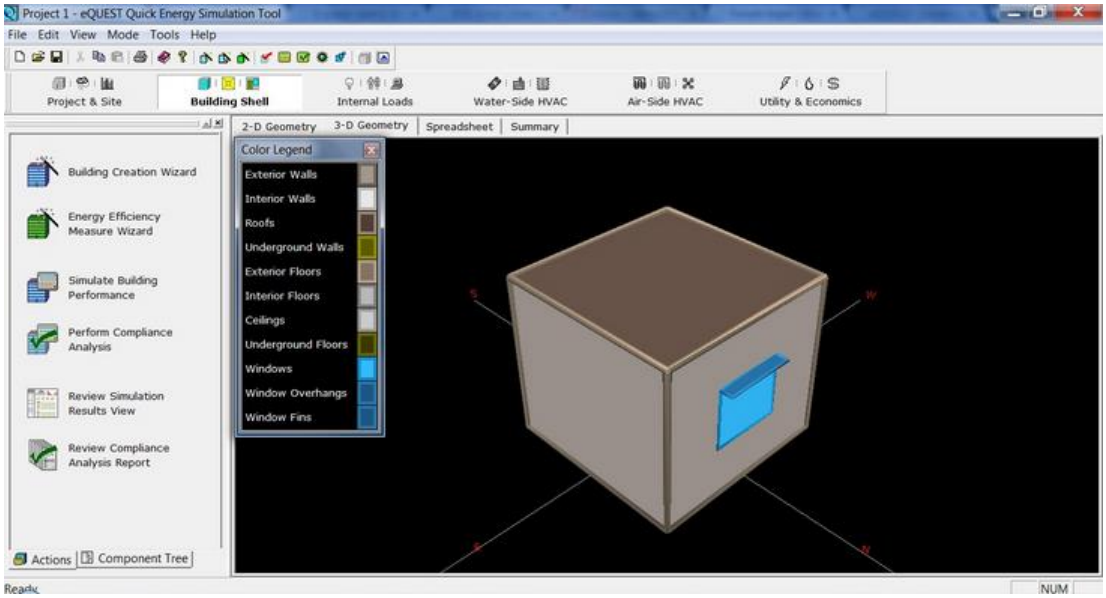
Esta herramienta permite una representación más precisa de los sistemas HVAC gracias al elevado número de variables y características que pueden se asignadas en relación con estos sistemas.

eQUEST

Esta herramienta de simulación energética de edificaciones ofrece resultados de alta calidad mediante la combinación tres asistentes: dos asistentes para la creación de edificaciones y sus instalaciones y, un asistente la realización de estudios de rendimiento energético. También incluye un módulo para la visualización de resultados [27].

La Figura C.3 muestra la interfaz gráfica de eQUEST. Ésta permite al usuario introducir de forma sencilla datos descriptivos de la edificación objeto de estudio y, visualizar la representación bidimensional y tridimensional de la geometría del edificio, la cual puede ser importada a través de archivos en formatos DWG y gbXML [99].

Figura C.3. Interfaz gráfica de eQUEST.



Los asistentes de creación de edificios guían a los usuarios a través del proceso de creación del modelo virtual de la edificación. Las simulaciones energéticas son ejecutadas en forma horaria por el motor de simulación DOE 2, teniendo en cuenta la

información introducida en los asistentes y un archivo de datos climatológicos de la ubicación del edificio [27].

La creación del modelo virtual de la edificación se realiza a través de seis pasos o bloques de construcción: i) análisis de objetivos, ii) definición de datos climáticos y del sitio, iii) definición de las características de la envolvente, estructura, materiales y sombreado de la edificación, iv) determinación de la operación y programación del edificio, v) representación de cargas internas y vi) información de los sistemas HVAC [99]. La Tabla C.1 presenta la descripción de cada uno de los pasos involucrados en la creación de un modelo virtual de una edificación en eQUEST.

Tabla C.1. Descripción de los pasos involucrados en el modelo geométrico. Adaptado de [100].

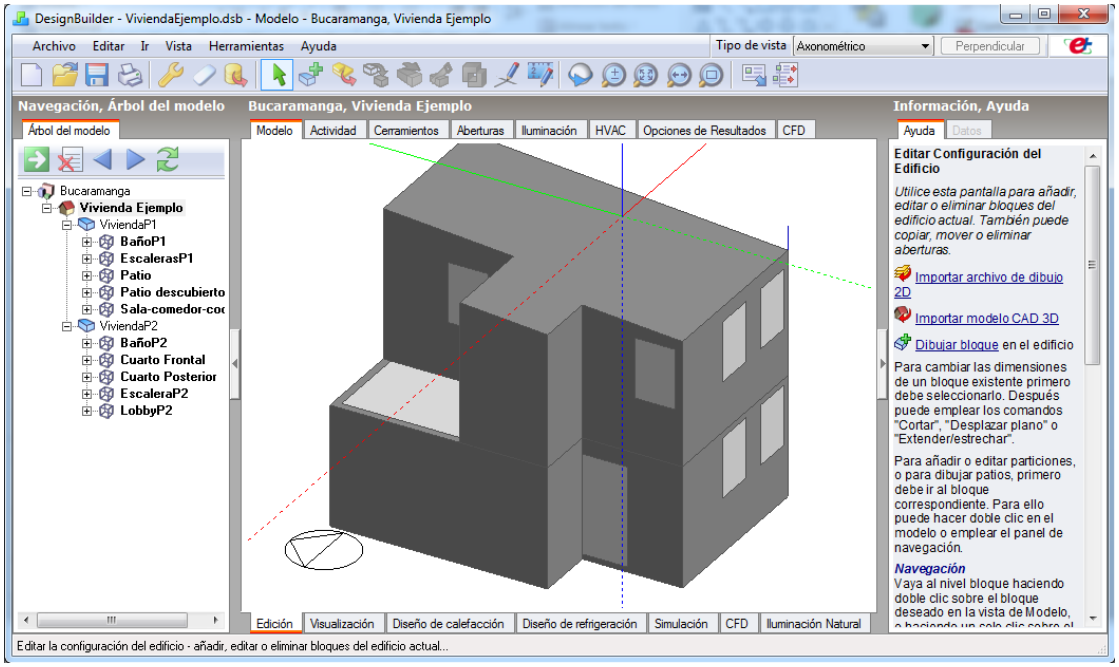
Paso	Descripción
Análisis de objetivos	Es necesario el modelo geométrico simplificado que representan los componentes más importantes de la edificación. Se definen las opciones de simulación.
Datos meteorológicos y del sitio de la edificación	Datos meteorológicos y del sitio de la edificación
Envolvente, estructura, materiales, sombreado de edificación	Se definen las características geométricas y constructivas de la edificación (deben tenerse en cuenta las dimensiones y materiales de la edificación).
Operación y programación del edificio.	Se determinan los horarios y el calendario de funcionamiento de la ocupación, equipos internos, sistemas de climatización. eQUEST proporciona operaciones por defecto, basados en el tipo de edificación.
Cargas internas	Se representan las cargas internas de personas, luminarias y equipos para calcular las ganancias de calor, además de sus efectos en el consumo de energía por refrigeración y calefacción.
Rendimiento y equipos	Rendimiento y equipos

eQUEST ofrece varios formatos gráficos para la visualización de resultados, Por ejemplo, es posible obtener los gráficos de energía consumida en el edificio, de manera mensual o anual; también existe la posibilidad de obtener reportes comparativos de resultados. Adicionalmente, el software permite conocer costos energéticos y análisis de luz natural [27], [97].

DesignBuilder

Esta herramienta de simulación energética es una de las interfaces gráfica más populares del motor de simulación de EnergyPlus. Posee un entorno de modelización intuitivo y visual donde se integran diferentes módulos para el análisis del comportamiento energético y ambiental [99], [101]. La Figura C.4 muestra la interfaz gráfica de DesignBuilder.

Figura C.4. Interfaz gráfica de DesignBuilder.

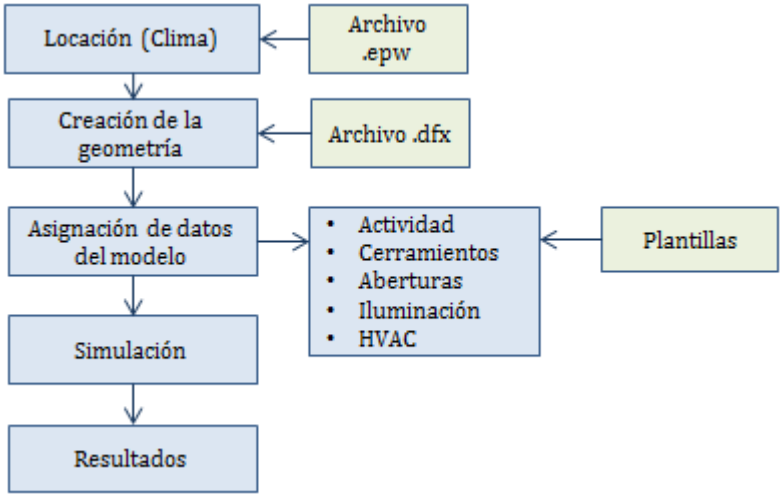


Esta herramienta permite analizar el comportamiento energético de un edificio a través de resultados de consumo energético, ganancias térmicas interiores, confort térmico, ganancias térmicas a través de cerramiento y emisiones contaminantes, entre otros. También permite el dimensionamiento de los sistemas de refrigeración y climatización [97], [100].

La Figura C.5 presenta el diagrama de flujo de DesignBuilder. Éste comienza con la selección de una ubicación y el archivo de datos climáticos correspondiente, posteriormente se realiza la creación de la geometría del edificio mediante la interfaz CAD incorporada. Una vez se obtiene el modelo geométrico de la edificación, se procede a realizar la asignación de las entradas del modelo, las cuales están clasifican en cinco categorías de datos: actividad, cerramientos, aberturas, iluminación y HVAC.

Para facilitar la asignación de las entradas DesignBuilder integra una gran cantidad de plantillas y bibliotecas de datos que contiene información sobre diferentes componentes de la edificación (materiales, equipos, regímenes de uso y ocupación, entre otros).

Figura C.5. Diagrama de flujo de DesignBuilder. Tomado de [99].



Esta herramienta de simulación puede ser empleada como apoyo en todas las fases del proceso de diseño, debido a que soporta diferentes niveles de información [99].

La versión 3.4.0 (versión usada en este trabajo de investigación) incluye seis módulos, uno de visualización y cinco de cálculo (diseño de refrigeración, diseño de calefacción, simulación, daylighting y CFD). El módulo de visualización ofrece una representación visual del modelo geométrico y el sombreamiento en distintos instantes del año. Mientras que los módulos de cálculo soportan el análisis de cargas de climatización, condiciones de confort térmico, estimación del consumo energético, emisiones de CO_2, fuentes de calentamiento de espacios interiores, análisis de luz natural y análisis de flujos de aire, entre otros [101].

Versiones más recientes incluyen tres módulos adicionales destinados a la optimización, el análisis económico y la administración de sistemas energéticos. También integran nuevos componentes a sus librerías de datos que permiten el

modelado de paneles fotovoltaicos y aerogeneradores y, facilitan la obtención del edificio de referencia del Apéndice G de la ASHRAE 90.1.

La Tabla C.2 resume las características más importantes de cada herramienta de simulación energética.

Tabla C.2. Resumen de características de las HSE preseleccionadas.

Herramienta	Tipo de licencia	Características relevantes	Resultados	Uso en el proceso de diseño
Ecotect	Paga	- Modelado 3D. - Entradas textuales y por bibliotecas de datos. - Resultados en gráficas y tablas.	- Consumo energético. - Luz natural. - Radicación solar sobre componentes - Confort térmico. - Sombreado.	Etapas tempranas
EnergyPlus	Gratuita	- Entradas y salidas textuales. - Definición en mayor detalle de los sistemas de un edificio. - Extensas bibliotecas de datos. - No permite representar la geometría del edificio.	- Consumo energético. - Confort térmico. - Ganancias térmicas interiores y en cerramientos. - Emisiones de CO_2. - Luz natural.	Todo el proceso
eQUEST	Gratuita	- Interfaz organizada por asistentes. - Modelado 3D. - Resultados en gráficas y tablas. - Entrada textual de datos.	- Consumo energético - Costos de la energía. - Luz natural. - Reportes comparativos.	Etapas finales
DesignBuilder	Paga	- Modelado 3D. - Extensas bibliotecas de datos y componentes. - Resultados en gráficas y tablas.	- Consumo energético. - Confort térmico. - Ganancias térmicas interiores y en cerramientos. - Emisiones de CO_2. - Luz natural y CFD.	Todo el proceso

ANEXO D. CALIFICACIÓN DE LOS CRITERIOS DE SELECCIÓN

Este anexo describe la calificación de cada uno de los criterios de selección elegidos para la evaluación de las HSE preseleccionadas. Para obtener la calificación que presenta una HSE en un criterio de selección se consideró el siguiente procedimiento:

- Paso 1: Asignar un puntaje (de 1 a 5 puntos) a cada una de las características que describen el criterio de selección de acuerdo al grado de implementación que ésta presenta en la HSE. Como se mencionó en el Capítulo 2, el criterio para la asignación de puntajes que se tuvo en cuenta fue la descripción de capacidades de las HSE encontrada en artículos científicos, sitios web de soporte al usuario y trabajos de apropiación previos del grupo de investigación.

- Paso 2: La calificación de la HSE en el criterio de selección corresponde con el promedio de los puntajes asignados en el Paso 1.

A continuación, en las tablas D.1 a D.6 se presentan la calificación obtenida por las HSE en cada criterio de selección, así como el detalle de la puntuación de las características que describen cada criterio.

Tabla D.1 Calificación del criterio de usabilidad y administración de información en la interfaz.

Característica	DesignBuilder	Energy+	eQUEST	Ecotect
Representación gráfica de los resultados de salida.	4	2	3	4
Uso flexible y navegación sencilla en la interfaz.	3	3	3	3
Representación gráfica de los resultados en el modelo 3D del edificio.	3	1	1	3
Representación gráfica de la geometría del edificio.	5	1	3	5
Almacenamiento de datos flexible y uso personalizado de características.	4	3	3	3
Introducción, revisión y modificación de las entradas de manera sencilla.	3	3	2	3
Calificación Usabilidad y administración de la información en la interfaz	**3,7**	**2,2**	**2,5**	**3,5**

Tabla D.2. Calificación del criterio de soporte para la toma de decisiones de diseño.

Característica	DesignBuilder	Energy+	eQUEST	Ecotect
Orientación en códigos de edificaciones y sistemas de cumplimiento (ASHRAE 90.1, LEED, otros).	4	3	3	1
Incluye Base de datos de casos de estudio para la toma de decisiones.	3	3	1	1
Incluye Valores por defecto para facilitar los datos de entrada.	3	3	3	3
Incluye Librerías extensas de datos climáticos, componentes y sistemas.	4	4	3	4
Creación de reportes comparativos para múltiples alternativas de diseño.	1	1	3	2
Ayuda online y cursos de entrenamiento a sus usuarios.	4	4	3	3
Posibilidad de Análisis energéticos rápidos que soportan la toma de decisiones.	3	3	3	3
Posibilidad de Análisis de sensibilidad e incertidumbre de parámetros de diseño clave.	3	3	2	2
Uso en todas las etapas del proceso de diseño.	4	4	3	3
Validación de la herramienta.	5	5	3	2
Calificación Soporte para la toma de decisiones de diseño	**3,4**	**3,3**	**2,7**	**2,4**

Tabla D.3. Calificación del criterio de capacidad para simular edificaciones con componentes complejos.

Característica	DesignBuilder	Energy+	eQUEST	Ecotect
Simulación de estrategias de diseño complejas.	4	4	2	2
Simulación de sistemas de energía renovable.	2	3	1	1
Evaluación de emisiones relacionadas con el uso de energía en los edificios.	3	3	2	3
Soporta varios tipos de sistemas HVAC.	4	4	3	2
Permite la Simulación de diferentes tipos de edificaciones.	3	3	3	3
Calificación Capacidad para simular edificaciones con componentes complejos	**3,2**	**3,4**	**2,2**	**2,2**

Tabla D.4. Calificación del criterio de interoperabilidad.

Característica	DesignBuilder	Energy+	eQUEST	Ecotect
Intercambio de modelos con paquetes 3D.	3	3	1	3
Intercambio de modelos con paquetes CAD.	4	2	1	3
Intercambio de modelos con paquetes MEP.	3	3	1	1
Calificación Interoperabilidad	3,3	2,7	1,0	2,3

Tabla D.5. Calificación del criterio de pertinencia de la herramienta en el proceso de diseño de edificaciones en el trópico.

Característica	DesignBuilder	Energy+	eQUEST	Ecotect
Soporta Análisis de ganancias térmicas	4	4	1	4
Soporta Análisis de confort térmico.	4	3	1	3
Soporta el modelado y análisis de dispositivos de sombreado.	4	3	3	3
Soporta el modelado y análisis de estrategias de ventilación natural.	3	3	2	2
Soporta el modelado y análisis de estrategias de iluminación natural.	4	4	3	3
Calificación pertinencia de la herramienta en el proceso de diseño de edificaciones en el trópico.	**3,8**	**3,4**	**2,0**	**3,0**

Tabla D.6. Calificación del criterio de representatividad en el uso en edificaciones tropicales.

Característica	DesignBuilder	Energy+	eQUEST	Ecotect
Número de artículos científicos en los que es usada la herramienta.	3	4	1	2

La calificación final de cada HSE fue calculada como el promedio de las calificaciones que obtuvo la HSE en cada uno de los criterios de selección.

ANEXO E. DATOS DE LOS MODELOS VIRTUALES

Este anexo contiene los datos introducidos en los modelos virtuales de las edificaciones objeto de estudio.

Tabla E.1. Ganancias térmicas por computadores del Edificio de Ingeniería Eléctrica.

Piso	Zona	Computador de escritorio	Portátiles	Potencia computadores [W]	Ganancias computadores [W/m^2]
Sótano	Puestos de trabajo	0	15	1500	15.7
Piso 1	Centro de estudios	3	0	600	13
	sala de trabajo grupal	0	20	2000	20.9
	Sala de trabajo individual	0	60	6000	49
	IEEE	4	2	1000	26.2
Piso 5	Coordinación de pregrado	2	0	400	17
	Oficinas modulares	9	0	1800	8.9
	Dirección E3t	1	0	200	9.9
	CCTV	2	1	500	60.4

Tabla E.2. Ganancias térmicas por equipos ofimáticos del Edificio de Ingeniería Eléctrica.

Piso	Zona	Impresora	Escáner	Potencia ofimáticos [W]	Ganancia ofimáticos [W/m^2]
Piso 3	IEEE	1	0	370	9.7
Piso 5	Coordinación de pregrado	2	1	890	37.7
	Oficinas modulares	5	1	2000	9.8
	Dirección E3t	1	1	520	25.7

Tabla E.3. Ganancias térmicas por misceláneos del Edificio de Ingeniería Eléctrica.

Piso	Zona	Proyector	Televisor LED	Smart Board	Potencia misceláneos [W]	Ganancia misceláneas [W/m^2]
Sótano	Baño M	0	0	0	5	2.2
	Baño H	0	0	0	5	2.3
	Áreas comunes	0	0	0	5	0.1
	Puestos de trabajo	0	0	0	5	0.1
	Cafetería	0	0	0	5	1.3
	Planta	0	0	0	5	0.1
	Subestación	0	0	0	5	0.1
Piso 1	Baños H	0	0	0	5	0.2

	Baños M	0	0	0	5	0.3
	Corredor baños	0	0	0	5	0.1
	Centro de estudios	0	0	0	5	0.1
	sala de trabajo grupal	0	0	0	5	0.1
	Sala de trabajo individual	0	0	0	5	0.0
	Aula 1	0	0	0	5	0.1
	Corredor Sala Individual	0	0	0	5	0.1
	Hall principal	0	0	0	5	0.1
	Cuarto técnico 1	0	0	0	5	1.8
Piso 2	Aula 202	1	0	0	225	4.3
	Aula 201	1	0	0	225	3.4
	Baños H	0	0	0	5	0.2
	Baños M	0	0	0	5	0.3
	Cuarto técnico 2	0	0	0	5	0.6
	Aula 207	1	0	0	225	2.9
	Aula 206	1	0	0	225	5.7
	Aula 205	1	0	0	225	5.6
	Aula 204	1	0	0	225	3.4
	Corredor 2	0	0	0	5	0.0
	Cuarto de aseo	0	0	0	5	1.7
Piso 3	Aula 302	1	0	0	225	4.3
	Aula 301	1	0	0	225	3.4
	IEEE	0	0	0	5	0.1
	Aula 305	1	0	0	225	2.9
	Aula 304	1	0	0	225	2.1
	Corredor 3	0	0	0	5	0.0
	Cuarto técnico 3	0	0	0	5	0.6
	Baño M	0	0	0	5	0.3
	Baño H	0	0	0	5	0.2
	Cuarto de aseo	0	0	0	5	1.1
Piso 4	Aula 402	0	0	0	5	0.1
	Aula 401	1	0	1	235	3.7
	Aula 406	1	0	1	235	3.0
	Aula 405	1	0	1	235	2.9
	Aula 404	1	0	1	235	3.7
	Cuarto Técnico 4	0	0	0	5	0.7
	Baños H	0	0	0	5	0.2
	Baños M	0	0	0	5	0.3
	Cuarto de aseo	0	0	0	5	1.3
	Corredor 4 Oeste	0	0	0	5	0.2
	Corredor 4 Este	0	0	0	5	0.0
Piso 5	Coordinación de pregrado	0	0	0	5	0.2
	Cuarto técnico 5	0	0	0	5	0.5
	Corredor posgrado	0	0	0	5	0.4
	Corredor acceso	0	0	0	5	0.1
	Sala de reuniones	0	0	0	5	0.2
	Oficinas modulares	0	0	0	5	0.0

	Dirección E3t	0	0	0	5	0.2
	Baño dirección	0	0	0	5	1.3
	Aseo	0	0	0	5	2.3
	Baños H	0	0	0	5	1.5
	Baños M	0	0	0	5	2.3
	Cafetería	0	0	0	5	1.9
	CCTV	0	1	0	100	12.1

Tabla E.4. Densidad de personas por espacio del Edificio de Ingeniería Eléctrica.

Piso	**Zona**	**Área [m^2]**	**Ocupación [Personas]**	**Densidad de personas [Personas/m^2]**
Sótano	Baño M	2.29	1	0.4
	Baño H	2.19	1	0.5
	Áreas comunes	38.7	3	0.1
	Puestos de trabajo	95.41	15	0.2
	Cafetería	3.77	1	0.3
	Planta	35.76	0	0.0
	Subestación	38	0	0.0
Piso 1	Baños H	24.3	7	0.3
	Baños M	16.93	3	0.2
	Corredor baños	45.12	10	0.2
	Centro de estudios	46.39	12	0.3
	sala de trabajo grupal	95.73	70	0.7
	Sala de trabajo individual	122.4	65	0.5
	Aula 1	53.9	42	0.8
	Corredor Sala Individual	36	50	1.4
	Hall principal	77.6	25	0.3
	Cuarto técnico 1	2.8	1	0.4
Piso 2	Aula 202	52.85	35	0.7
	Aula 201	66.704	35	0.5
	Baños H	24.201	3	0.1
	Baños M	16.96	7	0.4
	Cuarto técnico 2	7.88	1	0.1
	Aula 207	76.3	54	0.7
	Aula 206	39.47	32	0.8
	Aula 205	40.18	32	0.8
	Aula 204	66.64	35	0.5
	Corredor 2	161.3	223	1.4
	Cuarto de aseo	2.91	1	0.3
Piso 3	Aula 302	52.85	35	0.7
	Aula 301	66.7	35	0.5
	IEEE	38.21	10	0.3
	Aula 305	77.68	55	0.7
	Aula 304	106.83	70	0.7

	Corredor 3	161.2	195	1.2
	Cuarto técnico 3	7.88	1	0.1
	Baño M	16.96	3	0.2
	Baño H	24.201	7	0.3
	Cuarto de aseo	4.42	1	0.2
Piso 4	Aula 402	53.2	35	0.7
	Aula 401	63.98	33	0.5
	Aula 406	78.65	35	0.4
	Aula 405	79.82	35	0.4
	Aula 404	63.4	35	0.6
	Cuarto Técnico 4	7.13	1	0.1
	Baños H	24.35	7	0.3
	Baños M	16.96	3	0.2
	Cuarto de aseo	3.8	1	0.3
	Corredor 4 Oeste	24.602	68	2.8
	Corredor 4 Este	135.12	105	0.8
Piso 5	Coordinación dpregrado	23.58	2	0.1
	Cuarto técnico 5	10.52	1	0.1
	Corredor posgrado	13.3	1	0.1
	Corredor acceso	93.8	3	0.0
	Sala de reuniones	21.9	10	0.5
	Oficinas modulares	203.21	11	0.1
	Dirección E3t	20.27	1	0.0
	Baño dirección	3.92	1	0.3
	Aseo	2.18	1	0.5
	Baños H	3.31	1	0.3
	Baños M	2.17	1	0.5
	Cafetería	2.66	1	0.4
	CCTV	8.28	1	0.1

Tabla E.5. Materiales constructivos del Edificio de Ingeniería Eléctrica.

Elemento	**Materiales**	**Espesor [m]**
Muros externos e internos en ladrillo	Mortero	0.025
	Ladrillo h10	0.1
	Mortero	0.025
Cubiertas	Sustrato	0.12
	Geotextil	0.01
	Polietileno de alta densidad	0.1
	Impermeabilizante	0.02
	Geotextil	0.01
	Concreto externo	0.05
	Placa aligerada en concreto	0.4
	Capa de aire	0.3
	Fibra mineral	0.01
Placas entrepiso	Placa aligerada en concreto	0.4

	Concreto externo	0.05
Muros internos y externos en Drywall	Drywall	0.01
	Aire	0.13
	Drywall	0.01

Tabla E.6. Ganancias de iluminación del Edificio de Ingeniería Eléctrica.

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

	Cuarto técnico 3	64	Suspendida	8,1
	Baño M	128	Suspendida	7,5
	Baño H	128	Suspendida	5,3
	Cuarto de aseo	26	Suspendida	5,9
Piso 4	Aula 402	408	Suspendida	7,7
	Aula 401	816	Empotrada	12,8
	Aula 406	944	Empotrada	12,0
	Aula 405	944	Empotrada	11,8
	Aula 404	944	Empotrada	14,9
	Cuarto Técnico 4	64	Suspendida	9,0
	Baños H	128	Suspendida	5,3
	Baños M	128	Suspendida	7,5
	Cuarto de aseo	26	Suspendida	6,8
	Corredor 4 Oeste	128	Suspendida	5,2
	Corredor 4 Este	512	Suspendida	3,8
Piso 5	Coordinación de pregrado	272	Empotrada	11,5
	Cuarto técnico 5	64	Suspendida	6,1
	Corredor posgrado	56	Suspendida	4,2
	Corredor acceso	304	Suspendida	3,2
	Sala de reuniones	272	Empotrada	12,4
	Oficinas modulares	1890	Empotrada	9,3
	Dirección E3t	272	Empotrada	13,4
	Baño dirección	26	Empotrada	6,6
	Aseo	26	Suspendida	11,9
	Baños H	26	Empotrada	7,9
	Baños M	26	Empotrada	12,0
	Cafetería	26	Empotrada	9,8
	CCTV	64	Empotrada	7,7

Tabla E.7. Capacidad de los sistemas de aire acondicionado del Edificio de Ingeniería Eléctrica.

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

Tabla E.8. Ganancias térmicas por equipos de cómputo Edificio de Ingeniería Industrial.

Piso	Zona	Computador de escritorio	Portátiles	Potencia computadores [W]	Ganancias computadores [W/m^2]
1	Laboratorios	1	0	200	1,1
	Salón Excelencia	1	0	200	1,3
	ACEII	1	0	200	1,7
	Salón Fundadores	1	0	200	2,5
	Salón emprendedores	1	0	200	1,9
	Profesores cátedra	0	2	200	2,7
	Sala de computo 11	36	0	7200	79,7
	Sala de computo 12	8	0	1600	36,7
	Auditorio	1	0	200	1,2
2	Aula 201	1	0	200	3
	Aula 202	1	0	200	3,3
	Aula 204	1	0	200	3,3
	Aula 205	1	0	200	3,2
	Aula 206	1	0	200	2,9
	C1	0	1	100	8,4
	C2	0	1	100	8,5
	C3	0	1	100	8,5
	C4	0	1	100	8,4
	C5	0	1	100	8,5
	C6	0	1	100	8,4
	C7	0	1	100	8,5
	C8	0	1	100	8,4
	C9	0	1	100	7,7
	C10	0	1	100	7,7
	C11	0	1	100	7,1
	C12	0	1	100	7,0
	C13	0	1	100	9,0
	C14	0	1	100	9,3
	C15	0	1	100	9,3
	C16	0	1	100	9,3
	C17	0	1	100	9,4
	C18	0	1	100	9,3
	C19	0	1	100	9,5
	C21	0	1	100	10,0
	C22	0	1	100	10,0
	C23	0	1	100	9,9
	C24	0	1	100	9,9
	C25	0	1	100	4,8
3	Aula 301	1	0	200	2,5
	Aula 302	1	0	200	3,3
	Aula 303	1	0	200	3,6
	Aula 304	1	0	200	3,4
	Aula 305	1	0	200	3,1
	Aula 306	1	0	200	2,9
	Aula 307	1	0	200	2,6
	Aula 309	1	0	200	4,1
	Aula 310	1	0	200	3,6
	Aula 311	1	0	200	4,3
	Aula 316	1	0	200	2,2

	Aula 317	1	0	200	1,7
4	Investigaciones	31	0	6200	39,9
	Aula 401	1	0	200	3,6
	Aula 402	1	0	200	3,4
	Posgrado 1	1	0	200	7,0
	Posgrado 2	1	0	200	5,6
	Maestría	1	0	200	3,0
	Oficina Posgrado	10	0	2000	24,0
	Director posgrado	2	0	400	17,3
	Secretaría	2	0	400	11,8
	Archivo	0	1	100	6,6
	Coordinador asistente	1	0	200	19,9
	Revista	1	0	200	17,1
	Auxiliatura	5	0	1000	33,2
5	Aula 501	1	0	200	2,5
	Aula 502	1	0	200	3,3
	Aula 503	1	0	200	3,5
	Aula 504	1	0	200	3,4
	Aula 505	1	0	200	3,1
	Aula 506	1	0	200	3,2
	Aula 508	1	0	200	3,2
	Aula 509	1	0	200	3,4
	Aula 510	1	0	200	4,4

Tabla E.9. Ganancias térmicas por equipos ofimáticos del Edificio de Ingeniería Industrial.

Piso	Zona	Impresora	Escáner	Potencia ofimáticos [W]	Ganancia ofimáticos [W/m^2]
Piso 1	ACEII	1	0	370	3,1
Piso4	Investigaciones	2	1	890	5,7
	Oficina Posgrado	1	1	520	6,2
	Director posgrado	1	0	370	16,0
	Secretaría	1	0	370	10,9

Tabla E.10. Ganancias térmicas por equipos misceláneos del Edificio de Ingeniería Industrial.

Piso	Zona	Proyector	Equipo Sonido	Potencia misceláneos [W]	Ganancia misceláneos [W/m^2]
1	Salón Excelencia	1	0	220	1,5
	Salón Fundadores	1	0	220	2,7
	Salón emprendedores	1	0	220	2,1
	Sala de reuniones	1	0	220	18,4
	Sala de computo 11	1	0	220	2,4
	Sala de computo 12	1	0	220	5,0
	Auditorio	1	0	220	1,3
2	Aula 201	1	0	220	2,8
	Aula 202	1	0	220	3,7
	Aula 204	1	0	220	3,7
	Aula 205	1	0	220	3,5
	Aula 206	1	0	220	3,1

	Sala de reuniones 21	1	0	220	12,0
	Sala de reuniones 22	1	0	220	23,2
	Sala de reuniones 23	1	0	220	24,0
3	Cabina de sonido	0	1	100	3,3
	Aula 301	1	0	220	2,8
	Aula 302	1	0	220	3,7
	Aula 303	1	0	220	3,9
	Aula 304	1	0	220	3,8
	Aula 305	1	0	220	3,4
	Aula 306	1	0	220	3,2
	Aula 307	1	0	220	2,9
	Aula 309	1	0	220	4,5
	Aula 310	1	0	220	3,9
	Aula 311	1	0	220	4,7
	Aula 316	1	0	220	2,4
	Aula 317	1	0	220	1,9
	Aula 401	1	0	220	3,9
	Aula 402	1	0	220	3,7
	Posgrado 1	1	0	220	7,7
	Posgrado 2	1	0	220	6,2
	Maestría	1	0	220	3,3
	Dirección escuela	1	0	220	4,0
	Aula 502	1	0	220	3,6
	Aula 503	1	0	220	3,9
	Aula 504	1	0	220	3,7
	Aula 505	1	0	220	3,4
	Aula 506	1	0	220	3,5
	Aula 508	1	0	220	3,5
	Aula 509	1	0	220	3,8
	Aula 510	1	0	220	4,8
	Auditorio 5	1	0	220	1

Tabla E.11. Densidad de personas por espacio del Edificio de Ingeniería Industrial.

Piso	**Zona**	**Área [m^2]**	**Ocupación [Personas]**	**Densidad de personas [Personas/m^2]**
Sótano	Subestación	32,48	0	0,00
	Planta	46,61	0	0,00
	Escaleras sótano (lateral)	5,54	6	1,08
	Laboratorios	185	40	0,22
	Baño sótano	8	2	0,25
	Bodega	28,57	0	0,00
	Escalera emergencia	3,82	0	0,00
1	Cuarto ascensor	3,74	0	0,00
	Ascensor 1	5,83	0	0,00
	Aseo 1	1,88	1	0,53
	Bodega excelencia	10,66	0	0,00
	Salón Excelencia	149,6	64	0,43
	ACEII	117,8	60	0,51
	Salón Fundadores	80,07	39	0,49

	Escalera lateral	5,48	6	1,09
	Salón emprendedores	107,1	54	0,50
	Profesores cátedra	74,45	35	0,47
	Sala de reuniones	11,96	12	1,00
	Corredor 1	244,1	193	0,79
	Sala de computo 11	90,29	36	0,40
	Sala de computo 12	43,6	12	0,28
	DescansoEscEmer1	8,02	0	0,00
	Baños Hombres 1	16,77	3	0,18
	Baños Mujeres 1	16,82	3	0,18
	Baño auditorio hombres	18,76	2	0,11
	Baño Auditorio mujeres	11,12	2	0,18
	Lobby Auditorio	79,12	60	0,76
	Entrada Auditorio	30,09	20	0,66
	Información	7,19	2	0,28
	Cuarto auditorio	10,81	0	0,00
	Auditorio	167,7	100	0,60
	Zona verde	78,7	5	0,06
	racks	10,86	0	0,00
	Cafetería exterior	28,33	5	0,18
2	Aula 201	78,8	39	0,50
	Aula 202	59,81	39	0,65
	Aula 204	59,96	39	0,65
	Aula 205	62,9	39	0,62
	Aula 206	69,85	39	0,56
	Sala de reuniones 21	18,31	12	0,66
	Sala de reuniones 22	9,47	10	1,06
	Sala de reuniones 23	9,18	10	1,09
	Ascensor 2	6,66	0	0,00
	Auditorio 2	170	0	0,00
	C1	11,84	3	0,25
	C2	11,83	3	0,25
	C3	11,77	3	0,25
	C4	11,86	3	0,25
	C5	11,82	3	0,25
	C6	11,84	3	0,25
	C7	11,82	3	0,25
	C8	11,96	3	0,25
	C9	13	3	0,23
	C10	13,02	3	0,23
	C11	14,11	3	0,21
	C12	14,35	3	0,21
	C13	11,05	3	0,27
	C14	10,73	3	0,28
	C15	10,73	3	0,28
	C16	10,73	3	0,28
	C17	10,66	3	0,28
	C18	10,71	3	0,28
	C19	10,55	3	0,28
	C21	10,04	3	0,30
	C22	10,04	3	0,30
	C23	10,09	3	0,30
	C24	10,09	3	0,30

	C25	20,71	3	0,14
	Baños Mujeres 2	15,82	3	0,19
	Baños Hombres 2	15,89	3	0,19
	Bodega	14,31	0	0,00
	Cabina de sonido	30,4	2	0,07
	DescansoEscEmer2	8,14	0	0,00
	Escaleras entre piso 2	67,59	6	0,09
	Corredor 2	345,3	152	0,44
	Corredor Sala reuniones	4,632	1	0,22
	Cafetería	6,229	1	0,16
3	Ascensor 3	6,62	0	0,00
	Aula 301	78,95	39	0,49
	Aula 302	60,2	39	0,65
	Aula 303	55,73	37	0,66
	Aula 304	58,52	32	0,55
	Aula 305	65,51	35	0,53
	Aula 306	67,97	36	0,53
	Aula 307	76,47	44	0,58
	Aula 309	49,21	35	0,71
	Aula 310	56,1	35	0,62
	Aula 311	46,8	30	0,64
	Aula 316	92,14	39	0,42
	Aula 317	116,5	44	0,38
	Baños Mujeres 3	16,09	3	0,19
	Baños Hombres 3	15,98	3	0,19
	DescansoEscEmer3	8,1	0	0,00
	Corredor 3	229,5	297	1,29
	Escaleras entre piso 3	21,94	6	0,27
	racks 3	9,49	0	0,00
	Bodega 3	8,2	0	0,00
4	Investigaciones	155,5	25	0,16
	Ascensor 4	6,61	0	0,00
	Aula 401	56,32	32	0,57
	Aula 402	58,91	32	0,54
	Baño coordinador	4,45	1	0,22
	Baño dirección	7,65	1	0,13
	Baños Mujeres 4	15,97	3	0,19
	Baños Hombres 4	16,13	3	0,19
	Posgrado 1	28,72	20	0,70
	Posgrado 2	35,51	44	1,24
	Coordinador 1	10,74	2	0,19
	Coordinador 2	10,53	2	0,19
	Escaleras entre piso 4	22,44	6	0,27
	Pasillo coordinaciones	26,14	3	0,11
	DescansoEscEmer4	8,61	0	0,00
	Corredor 4	260	72	0,28
	Maestría	67,1	44	0,66
	Oficina Posgrado	83,41	39	0,47
	Director posgrado	23,1	3	0,13
	Secretaría	34	6	0,18
	Dirección escuela	54,52	1	0,02
	Archivo	15,14	1	0,07
	Coordinador asistente	10,07	2	0,20

	Cafetería	5,71	1	0,18
	Revista	11,7	2	0,17
	Auxiliatura	30,15	10	0,33
5	Aula 501	78,65	39	0,50
	Aula 502	60,52	32	0,53
	Aula 503	56,54	32	0,57
	Aula 504	58,99	32	0,54
	Aula 505	65,32	35	0,54
	Aula 506	62,38	39	0,63
	Aula 508	63,05	39	0,62
	Aula 509	58,39	35	0,60
	Aula 510	45,65	30	0,66
	Ascensor 5	6,65	0	0,00
	Baños Hombre 5	16,59	3	0,18
	Baños Mujeres 5	16,08	3	0,19
	DescansoEscEmer5	7,91	0	0,00
	Escaleras entre piso 5	22,1	6	0,27
	Corredor 5	214,3	208	0,97
	Auditorio 5	201,7	70	0,35
	Bodega auditorio 5	6,43	0	0,00
	Cafetería	11,45	2	0,17

Tabla E.12. Materiales constructivos del Edificio de Ingeniería Industrial.

Elemento	Materiales	Espesor [m]
Muros exteriores	Yeso	0,003
	Mortero	0,015
	Ladrillo H10	0,1
	Mortero	0,015
	Yeso	0,003
Cubierta	Asfalto	0,005
	Mortero	0,1
	Concreto armado	0,5
	Aire	0,3
	Fibra mineral	0,01
Placa entre piso	Granito	0,01
	Mortero	0,1
	Concreto armado	0,5
	Aire	0,3
	Fibra mineral	0,01
Piso sobre el terreno	Concreto armado	0,085
	Mortero	0,005
	Granito	0,01

Tabla E.13. Potencia de iluminación del Edificio de Ingeniería Industrial.

Piso	Zona	Potencia [W]	Tipo de luminaria	Ganancias por iluminación [W/m^2]
Sótano	Subestación	324	Superpuesta	10,0
	Planta	108	Superpuesta	2,3
	Escaleras sótano (lateral)	104	Empotrada	18,8
	Laboratorios	864	Empotrada	4,7
	Baño sótano	52	Empotrada	6,5
	Bodega	312	Superpuesta	10,9
1	Aseo 1	26	Superpuesta	13,8
	Bodega excelencia	52	Empotrada	4,9
	Salón Excelencia	648	Empotrada	4,3
	ACEII	648	Empotrada	5,5
	Salón Fundadores	648	Empotrada	8,1
	Escalera lateral	52	Empotrada	9,5
	Salón emprendedores	640	Empotrada	6,0
	Profesores cátedra	816	Empotrada	11,0
	Sala de reuniones	136	Empotrada	11,4
	Corredor 1	1612	Empotrada	6,6
	Sala de computo 11	500	Empotrada	5,5
	Sala de computo 12 (oficina)	216	Empotrada	5,0
	Baños Hombres 1	108	Empotrada	6,4
	Baños Mujeres 1	108	Empotrada	6,4
	Baño auditorio hombres	108	Empotrada	5,8
	Baño Auditorio mujeres	108	Empotrada	9,7
	Lobby Auditorio	648	Empotrada	8,2
	Información	108	Empotrada	15,0
	Cuarto auditorio	108	Superpuesta	10,0
	Auditorio	756	Empotrada	4,5
	racks	26	Superpuesta	2,4
	Cafetería exterior	162	Superpuesta	5,7
2	Aula 201	324	Empotrada	4,1
	Aula 202	324	Empotrada	5,4
	Aula 204	324	Empotrada	5,4
	Aula 205	324	Empotrada	5,2
	Aula 206	324	Empotrada	4,6
	Sala de reuniones 21	408	Empotrada	22,3
	Sala de reuniones 22	272	Empotrada	28,7
	Sala de reuniones 23	272	Empotrada	29,6
	C1	136	Empotrada	11,5
	C2	136	Empotrada	11,5
	C3	136	Empotrada	11,6
	C4	136	Empotrada	11,5
	C5	136	Empotrada	11,5
	C6	136	Empotrada	11,5
	C7	136	Empotrada	11,5
	C8	136	Empotrada	11,4
	C9	136	Empotrada	10,5
	C10	136	Empotrada	10,4
	C11	136	Empotrada	9,6
	C12	136	Empotrada	9,5

	C13	136	Empotrada	12,3
	C14	136	Empotrada	12,7
	C15	136	Empotrada	12,7
	C16	136	Empotrada	12,7
	C17	136	Empotrada	12,8
	C18	136	Empotrada	12,7
	C19	136	Empotrada	12,9
	C21	136	Empotrada	13,6
	C22	136	Empotrada	13,6
	C23	136	Empotrada	13,5
	C24	136	Empotrada	13,5
	C25	136	Empotrada	6,6
	Baños Mujeres 2	108	Empotrada	6,8
	Baños Hombres 2	108	Empotrada	6,8
	Bodega	108	Empotrada	7,5
	Cabina de sonido	136	Empotrada	4,5
	Escaleras entre piso 2	216	Superpuesta	3,2
	Corredor 2	2052	Empotrada	5,9
	Corredor Sala reuniones	216	Empotrada	46,6
	Cafetería	52	Empotrada	8,3
	Aula 302	324	Empotrada	5,4
	Aula 303	216	Empotrada	3,9
	Aula 304	216	Empotrada	3,7
	Aula 305	216	Empotrada	3,3
	Aula 306	324	Empotrada	4,8
	Aula 307	324	Empotrada	4,2
	Aula 309	216	Empotrada	4,4
	Aula 310	216	Empotrada	3,8
	Aula 311	216	Empotrada	4,6
	Aula 316	432	Empotrada	4,7
	Aula 317	432	Empotrada	3,7
	Baños Mujeres 3	108	Empotrada	6,7
	Baños Hombres 3	108	Empotrada	6,8
	Corredor 3	1716	Empotrada	7,5
	Escaleras entre piso 3	216	Superpuesta	9,8
	racks 3	26	Superpuesta	2,7
	Bodega 3	108	Empotrada	13,2
4	Investigaciones	1700	Empotrada	10,9
	Aula 401	216	Empotrada	3,8
	Aula 402	216	Empotrada	3,7
	Baño coordinador	26	Empotrada	5,8
	Baño dirección	26	Empotrada	3,4
	Baños Mujeres 4	108	Empotrada	6,8
	Baños Hombres 4	108	Empotrada	6,7
	Posgrado 1	162	Empotrada	5,6
	Posgrado 2	162	Empotrada	4,6
	Coordinador 1	136	Empotrada	12,7
	Coordinador 2	136	Empotrada	12,9
	Escaleras entre piso 4	216	Empotrada	9,6
	Pasillo coordinaciones	108	Empotrada	4,1
	Corredor 4	1608	Empotrada	6,2
	Maestría	816	Empotrada	12,2
	Oficina Posgrado	952	Empotrada	11,4

	Director posgrado	68	Empotrada	2,9
	Secretaría	360	Empotrada	10,6
	Dirección escuela	272	Empotrada	5,0
	Archivo	204	Empotrada	13,5
	Coordinador asistente	136	Empotrada	13,5
	Cafetería	52	Empotrada	9,1
	Revista	104	Empotrada	8,9
	Auxiliatura	408	Empotrada	13,5
5	Aula 501	324	Empotrada	4,1
	Aula 502	324	Empotrada	5,4
	Aula 503	216	Empotrada	3,8
	Aula 504	216	Empotrada	3,7
	Aula 505	216	Empotrada	3,3
	Aula 506	324	Empotrada	5,2
	Aula 508	324	Empotrada	5,1
	Aula 509	216	Empotrada	3,7
	Aula 510	216	Empotrada	4,7
	Baños Hombre 5	108	Empotrada	6,5
	Baños Mujeres 5	108	Empotrada	6,7
	Escaleras entre piso 5	216	Superpuesta	9,8
	Corredor 5	1560	Empotrada	7,3
	Auditorio 5	864	Empotrada	4,3
	Bodega auditorio 5	52	Empotrada	8,1
	Cafetería	52	Empotrada	4,5

Tabla E.14. Capacidad de los sistemas de aire acondicionado del Edificio de Ingeniería Industrial.

Piso	**Zona**	**Capacidad kW**
Sótano	Laboratorios	28,54
	Salón Excelencia	28,19
	ACEII	42,29
	Salón Fundadores	21,22
	Salón emprendedores	29,48
	Profesores cátedra	16,41
	Sala de reuniones	3,6
	Sala de computo 11	28,31
	Sala de computo 12 (oficina)	2,2
	Auditorio	46,87
2	Aula 201	21,22
	Aula 202	16,41
	Aula 204	16,41
	Aula 205	16,41
	Aula 206	21,22
	Sala de reuniones 21	5,6
	Sala de reuniones 22	2,2
	Sala de reuniones 23	2,2
	C1	2,2
	C2	2,2
	C3	2,2
	C4	2,2
	C5	2,2
	C6	2,2
	C7	2,2

	C8	2,2
	C9	2,81
	C10	2,81
	C11	2,81
	C12	2,81
	C13	2,81
	C14	2,81
	C15	2,2
	C16	2,2
	C17	2,2
	C18	2,2
	C19	2,2
	C21	2,2
	C22	2,2
	C23	2,2
	C24	2,2
	C25	2,2
	Bodega	2,81
	Cabina de sonido	5,96
	Aula 301	21,22
	Aula 302	16,41
	Aula 303	16,41
	Aula 304	16,41
	Aula 305	16,41
	Aula 306	21,22
	Aula 307	24,62
	Aula 309	12,72
	Aula 310	14,18
	Aula 311	12,69
	Aula 316	24,62
	Aula 317	30,6
4	Investigaciones	28,02
	Aula 401	16,41
	Aula 402	16,41
	Posgrado 1	8,21
	Posgrado 2	8,21
	Coordinador 1	2,2
	Coordinador 2	2,2
	Pasillo coordinaciones	5,6
	Maestría	11,19
	Oficina Posgrado	19,02
	Director posgrado	2,81
	Secretaría	7,21
	Dirección escuela	11,2
	Coordinador asistente	2,2
	Revista	2,78
	Auxiliatura	7,09
5	Aula 501	21,22
	Aula 502	16,41
	Aula 503	16,41
	Aula 504	16,41
	Aula 505	16,41
	Aula 506	21,22

	Aula 508	17,7
	Aula 509	16,412
	Aula 510	11,19
	Auditorio 5	56,39

Tabla E.15. Inventario de equipos de la Vivienda de Interés Social.

Zona	Número	Descripción	Potencia [W]
Alcoba balcón	1	PC	100
Alcoba Patio	1	TV	130
Patio	1	Lavadora	400
Sala - comedor - cocina	1	Plancha	1000
	1	Nevera	300
	1	Ventilador	50

Tabla E.16. Materiales de la Vivienda de Interés Social.

Elemento	Materiales	Espesor [m]
Muro exterior	Ladrillo H10	0,2
Placa entrepiso	Concreto pesado	0,03
	Ladrillo H10	0,14
	Concreto liviano	0,03
Cubierta	Concreto pesado	0,03
	Ladrillo H10	0,14
	Mortero	0,03
Suelo sobre el terreno	Concreto pesado	0,1

Tabla E.17. Inventario luminarias de la Vivienda de Interés Social.

Zona	Luminaria	Potencia [W]
Alcoba balcón	1	20
Alcoba Patio	1	20
Baño P2	1	10
Escaleras P2	2	40
Baño P1	1	10
Patio	1	20
Sala - comedor -cocina	2	40