



Institución Universitaria

# **Evaluación de herramientas de simulación del desempeño energético en edificios para el caso colombiano**

José Ignacio Bedoya Osorio

Instituto Tecnológico Metropolitano  
Facultad de Ingenierías  
Medellín, Colombia  
2017



# **Evaluación de herramientas de simulación del desempeño energético en edificios para el caso colombiano**

José Ignacio Bedoya Osorio

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:  
Magister en Gestión Energética Industrial

Directores:

Ing. Luz Adriana Trejos Grisales, MSc

Ing. Adolfo Escobar Ordoñez, PhD

Línea de Investigación:

Eficiencia Energética

Grupo de Investigación:

Materiales Avanzados y Energía

Instituto Tecnológico Metropolitano

Facultad de Ingenierías

Medellín, Colombia

2017



*Dedico este trabajo a todas aquellas personas que de alguna manera contribuyeron a no declinar en la culminación de este proyecto de vida: A mis hermanos, esposa Gloria y mi hijo Daniel, quienes siempre me dieron el apoyo en los momentos más difíciles, cuando se pensaba que no se podía terminar.*

*A mis compañeros de trabajo y la empresa UNE, quienes siempre dispusieron los medios para realizar las diferentes prácticas y el trabajo investigativo.*

*Y ante todo a Dios, que dispuso de todas estas lindas personas a mi lado para que me apoyaran y pudiera finalmente verle fin a este desafío.*



## **Agradecimientos**

Agradezco a los asesores, la profesora Luz Adriana Trejos Grisales y el profesor Adolfo Escobar Ordoñez, quienes me apoyaron todo este tiempo para poder culminar este trabajo. De igual manera a la profesora María Elena Moncada Acevedo, coordinadora de la Maestría en Gestión Energética Industrial.

Agradezco a todos los profesores de posgrado del ITM que aportaron al conocimiento que se adquirió durante todo el período académico de esta maestría.



## Resumen

La demanda de energía en los diferentes sectores de la sociedad ha ido creciendo conforme ha ido creciendo la población. De esta forma cada día se generan más proyectos de diferentes tipos de edificaciones donde se garantice la comodidad para sus usuarios. Teniendo en cuenta que los recursos energéticos no son inagotables y que la capacidad instalada basada en energías renovables aún no es suficiente para cubrir toda la demanda, es necesario implementar acciones de uso racional y eficiente de la energía para obtener ahorros y así garantizar la disponibilidad del recurso en el futuro. En el caso particular de los edificios, son múltiples los sistemas que requieren energía eléctrica y térmica, y en particular los edificios de servicios (oficinas y actividades comerciales) y residenciales son consumidores de altas cantidades de energía comparados con otros sectores de la sociedad.

Con el fin de abordar la evaluación energética en edificios, instituciones e investigadores han desarrollado herramientas informáticas para la simulación de diferentes sistemas energéticos existentes en los edificios como iluminación, ventilación y calefacción, agua caliente sanitaria, cargas eléctricas, entre otros. En esta tesis se estudiaron diferentes herramientas informáticas para la evaluación del desempeño energético en edificios y se aplicaron tres de ellas (Calener, eQuest y EnergyPlus) a un mismo caso: el edificio administrativo de UNE-Tigo ubicado en el sector de La América. Se analizaron para cada una, los datos requeridos para la simulación, el modo de operación, los tipos de sistemas que soporta y la presentación de resultados, con el fin de escoger una de las herramientas para evaluar diferentes medidas de ahorro energético en el edificio mencionado.

La selección de la herramienta se hizo de acuerdo con las prestaciones de las herramientas y su aplicabilidad al caso colombiano. Por lo tanto, se escogió la herramienta EnergyPlus para la evaluación mediante simulación de diferentes medidas de ahorro energético en iluminación, fachada, sistema HVAC y equipos eléctricos.

Las medidas evaluadas podrían generar un ahorro de energía anual de entre aproximadamente 1000 kWh (para las medidas que involucran mejoras en la iluminación y en el uso de equipos internos) hasta aproximadamente 8000 kWh (para las medidas que involucran los sistemas de refrigeración y de ventilación). En conjunto todas las medidas podrían ahorrar aproximadamente 26000 kWh, lo que corresponde al 27% del consumo normal del edificio.

Palabras clave: Uso racional y eficiente, energía eléctrica, edificio terciario, herramienta computacional.

## Abstract

The energy demand for the different sectors of society has been increased as the population has been increased. In this way, everyday more building projects are generated where the comfort for the users must be guaranteed. Considering that energy resources are not inexhaustible and the installed capacity based on renewable sources is not enough to cover the entire demand, it is necessary to implement actions of rational and efficient use of energy to obtain savings and being able to guarantee the availability of the resource for the future. In the case of buildings, there are multiple systems which require electric and thermal energy, in particular the services buildings (offices and commercial activities) and residential buildings are consumers of high amounts of energy compared to other sectors of society.

To achieve the energy evaluation in buildings, institutions and researchers have developed informatics tools for the simulation of different energy systems which exist in buildings such lightning, ventilation and heating, sanitary hot water, electric charges, among others. In this thesis, different informatics tools for energy evaluation in buildings were studied, and three of them (Calener, eQuest and EnergyPlus) were applied to the same study case: the administrative building of UNE-Tigo placed in La America. For each one of the tools the required input data, the operation mode, the type of supported systems and the results presentation were analyzed, this in order of selecting one of the tools to evaluate different energy saving measures for the mentioned building.

The selection of the tools was made considering the benefits of each one and their adaptability to the Colombian case. Therefore, EnergyPlus was selected for the evaluation through the simulation of different energy saving measures in the lightning system, facade, HVAC system and electric equipment.

The assessed measures would generate an annual energy saving of 1000 kWh approximately (for the measures in the lightning system and the use of internal

equipment) and 8000 kWh (for the measures in ventilation and refrigeration systems). On the whole, all measures would save 26000 kWh approximately, which corresponds to 27% of the normal consume of the building.

Keywords: Rational and efficient use, electric power, tertiary buildings, computational tool.

# Contenido

## Pág.

1. Introducción .....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Objetivos .....	3
1.3 Organización del documento .....	3
2. Marco teórico.....	5
2.1 Consumo energético a nivel mundial .....	5
2.2 Eficiencia energética en edificios .....	11
2.2.1 Envolvente del edificio .....	15
2.2.2 Iluminación .....	16
2.2.3 Sistemas HVAC y ACS (Calor, ventilación, aire acondicionado y agua caliente sanitaria).....	16
2.2.4 Energías renovables.....	17
2.3 Principales enfoques y metodologías de evaluación para el desempeño energético en edificios .....	17
2.3.1 Enfoques en línea.....	19
2.3.2 Enfoques fuera de línea.....	19
2.4 Simulación del desempeño energético en edificios.....	21
2.4.1 Herramientas de simulación energética por subsistema .....	22
2.4.2 Herramientas integrales de simulación de desempeño energético en edificios.....	24
3. Metodología.....	33
3.1 Criterios a tener en cuenta para la selección de las herramientas de evaluación de desempeño energético .....	33
3.1.1 Uso de la energía .....	34
3.1.2 Ambiente global.....	34
3.1.3 Ambiente interior.....	35
3.1.4 Costos asociados en el logro de eficiencia energética en edificios .....	36
3.2 Aplicabilidad de las herramientas de evaluación de desempeño energético .....	37
3.3 Procedimiento general.....	43
3.3.1 Información general .....	43
3.3.2 Geometría del edificio.....	43
3.3.3 Definición de zonas .....	44

---

3.3.4 Horarios .....	44
3.3.5 Sistemas primarios .....	44
3.3.6 Sistemas secundarios.....	44
3.3.7 Evaluación económica.....	44
3.4 Descripción del caso de estudio .....	45
3.4.1 Edificio caso .....	45
3.4.2 Ubicación.....	45
3.4.3 Geometría.....	46
3.4.4 Materiales .....	47
3.4.5 Horario de funcionamiento.....	49
3.4.6 Sistemas y características del HVAC.....	50
3.5 Procedimiento de cálculo.....	51
3.5.1 CALENER GT.....	51
3.5.2 eQUEST/CAN-QUEST .....	55
3.5.3 EnergyPlus .....	59
3.6 Medidas evaluadas en el edificio caso.....	62
3.7 Consideraciones adicionales .....	63
3.7.1 Comportamiento del personal.....	63
3.7.2 Edificio.....	64
3.7.3 Sistemas de aire acondicionado .....	64
3.7.4 Sistema de iluminación.....	64
3.7.5 Equipos eléctricos.....	65
4. Resultados y discusión .....	67
4.1 Resultados de simulación caso de estudio .....	68
4.1.1 Calener.....	68
4.1.2 eQuest.....	71
4.1.3 EnergyPlus .....	74
4.2 Comparación entre herramientas.....	76
4.3 Medidas de ahorro energético evaluadas .....	82
4.3.1 Fachada .....	83
4.3.2 Iluminación .....	84
4.3.3 HVAC .....	84
4.3.4 Equipos eléctricos.....	86
5. Conclusiones y trabajo futuro.....	89
5.1 Conclusiones .....	89
5.2 Trabajo futuro .....	92
Bibliografía.....	93

# 1. Introducción

## 1.1 Antecedentes

Según datos del Departamento de Estado de Estados Unidos (DOE) (junio de 2015), de la demanda total energética en los países desarrollados, el 40% de la energía consumida corresponde al sector de edificios de oficinas y con tendencia a aumentar debido al estilo de empleo y vida que se impone en la era digital contemporánea. Entre un 15% y 40% de este total está representado en sistemas de climatización e iluminación respectivamente. De igual manera este sector es responsable del 36% de emisiones de CO<sub>2</sub> (Riedel, 2012). El incremento en la demanda de las actuales fuentes de energías primarias empieza a generar escasez de las mismas, además del calentamiento global que día a día es mayor, motivo por el cual se obliga a tomar medidas gubernamentales en todas las naciones del mundo que incentiven y a la vez regulen mediante métodos, el consumo, utilización y racionalización de estas fuentes.

En Colombia, el consumo final de energía en el sector terciario (centros comerciales, hospitalarios, educación, servicios y otros, hospedaje y recreación, supermercados de cadena, salud, grandes superficies y financiero), representa un 5% del neto de la demanda, lo cual es aproximadamente un consumo de energía superior a 3 TWh (Procolombia, 2015). Este sector terciario, para la economía colombiana, en comparación con economías desarrolladas aparentemente representa una cifra baja, pero para Colombia no deja de ser una cifra importante dado la pluralidad de actividades comerciales.

El desempeño energético, el ambiente interior y la reducción del impacto ambiental de los edificios son las principales prioridades de la política energética y medioambiental en todo el mundo. Al respecto, existe una gran cantidad de medidas que pueden tomarse las cuales deben considerar aspectos medioambientales, energéticos, financieros y sociales con el fin de hacer un diseño óptimo o la elección

operativa más adecuada. El problema de la toma de decisiones se caracteriza por la existencia de múltiples objetivos y en varios casos, ellos entran en conflicto ya que cada uno de ellos debe ser optimizado contra un conjunto de alternativas realistas y disponibles que se ve influenciada por un conjunto de parámetros y restricciones que deben ser tomados en cuenta.

Una cuestión fundamental, es el papel de la simulación en la evaluación de la sostenibilidad del edificio. Los enfoques utilizados para evaluar el desempeño energético y la minimización de la carga ambiental en el sector de la construcción se basan en la mayoría de los casos en análisis de simulación. En las últimas décadas, muchos esfuerzos se han dedicado al desarrollo de herramientas de simulación para modelar la dinámica de la energía y del ambiente interior. Sin embargo, aunque las herramientas son valiosas para el diseño y análisis detallado, solo algunas son capaces de analizar al mismo tiempo los aspectos térmicos, visuales y de calidad del aire en conjunto con las demandas de energía y de predicción de carga ambiental pre evaluadas por parte del diseñador.

Las herramientas de simulación en el desempeño energético existentes varían en una gran variedad de aspectos: simplicidad de uso, velocidad de simulación, robustez y exactitud en sus motores de cálculo entre otros. Estas herramientas, también permiten ayudar a evaluar y analizar edificaciones nuevas y existentes, en las que se pueden evidenciar partes de la estructura con potencial para optimizar y mejorar el rendimiento en los sistemas que involucra el desempeño energético. Por lo general, estas herramientas tienen la capacidad de modelar cualquier forma geométrica para los edificios, su orientación geográfica, zonas de cargas internas, medición en las emisiones de CO<sub>2</sub>, características del edificio en general, luz de día y solar, infiltración, ventilación y flujos de aire por zonas variables. La mayoría de estas herramientas han sido implementadas por entes gubernamentales de ciertos países, por tanto, están orientadas a las condiciones climáticas, ambientales, y de horarios de trabajo característicos del país de origen de la herramienta.

Por todo lo anterior, es importante investigar y estudiar a profundidad las principales herramientas para la simulación y el desempeño energético de edificios, con el fin de ayudar a conocer sus aplicaciones y las bases de datos que manejan en cuanto a climas y materiales para definir y ajustar su uso potencial en Colombia y de esa forma lograr ahorros energéticos.

## 1.2 Objetivos

En este trabajo se planteó evaluar herramientas de simulación del desempeño energético en edificios terciarios y su aplicabilidad al caso colombiano.

Los objetivos específicos fueron los siguientes:

- Identificar las herramientas más importantes de simulación de desempeño energético en edificios y adaptarlas al caso colombiano.
- Comparar los consumos y niveles del desempeño energético de las herramientas identificadas a partir de datos de simulación sobre un estudio caso.
- Evaluar estrategias de reducción de consumo mediante las herramientas de simulación para un caso de estudio.

## 1.3 Organización del documento

El Capítulo 1 es un capítulo introductorio en el cual se presentan las motivaciones que llevaron a emprender este trabajo de investigación. A continuación, se plantean los objetivos y posteriormente se presenta la estructura del documento.

En el Capítulo 2 se plantean los conceptos fundamentales sobre la problemática del consumo energético a nivel mundial, el aporte que hacen las edificaciones a ese consumo y aspectos generales sobre la eficiencia energética en edificios. Posteriormente, se analizan los principales sistemas que influyen en el consumo de energía en los edificios y se enumeran los principales enfoques y metodologías de evaluación para el desempeño energético en edificios. Finalmente, se describen las principales herramientas integrales de simulación de desempeño energético en edificios.

En el Capítulo 3 se presenta la metodología desarrollada para evaluar tres herramientas de simulación del desempeño energético en edificios terciarios y su aplicabilidad al caso colombiano. En primer lugar, se analizaron las principales herramientas de simulación integral (todos los sistemas) de consumo en edificios y se escogieron tres de estas de acuerdo con sus prestaciones. Con el fin de hacer una comparación entre ellas para evaluar su aplicabilidad al caso colombiano, se simuló un edificio de la ciudad de Medellín y con base en los resultados se escogió una de las herramientas para analizar diferentes medidas de ahorro energético que se pudieran implementar en el edificio.

En el Capítulo 4 se presentan los resultados y discusión de las simulaciones efectuadas con las tres herramientas sobre el edificio bajo estudio y de las oportunidades para reducir el consumo de energía simuladas con una de ellas. Las medidas de eficiencia energéticas simuladas en el edificio bajo estudio comprendieron cambios en el sistema de iluminación, modificaciones en la fachada, adecuaciones en el sistema de enfriamiento y cambios en el uso de los equipos eléctricos.

En el Capítulo 5 se presentan las principales conclusiones encontradas durante las etapas que comprendieron esta investigación y se plantean algunas recomendaciones para trabajos futuros.

## **2. Marco teórico**

Para entender la importancia de llevar a cabo la evaluación energética en edificaciones es necesario definir diferentes conceptos relativos a la eficiencia energética y al impacto de ésta en la sostenibilidad de un sistema donde se utilizan diferentes fuentes energéticas. En este capítulo se introducen dichos conceptos y se brinda una descripción de las diferentes herramientas que se consideran en esta tesis para la realización de la evaluación energética en una edificación. De igual forma se plantean las medidas de eficiencia energética que se deben tener en cuenta en sistemas de iluminación, HVAC y fachadas. Además, se definen aspectos relacionados con el aporte de sistemas basados en energía renovable y como se asocian al mejoramiento de la eficiencia energética en una edificación.

### **2.1 Consumo energético a nivel mundial**

La demanda de los recursos energéticos en el mundo a causa del incremento de la población mundial que se estima en 7,4 billones de personas en el año 2016 con un crecimiento de 2 billones por generación (Kannan, 2016) y la exigente calidad de vida contemporánea, hacen que las fuentes de energía sean cada vez más escasas y por tanto más costosa la obtención de la misma (Crossette, 2011). Para 1993, se tuvo un consumo de 12607 TWh, en 2011 se registró un aumento del 76% con 22202 TWh y para el 2020 se espera un incremento del 3,6% (World Energy Council, 2013), mientras que la disponibilidad de los recursos no renovables se compone de la siguiente manera: petróleo 32%, gas natural 23,7%, carbón 30%, energía hidroeléctrica 6,8%, energía nuclear 4,4% (Saud, 2015); lo cual hace evidente que en algún momento se llegará a la escasez de dichos recursos. Por tanto, se hace necesario disponer de estrategias y planes de mejoramiento del uso de dichas fuentes energéticas con el fin de evitar futuras crisis de desabastecimiento.

Una de las consecuencias del crecimiento de la población en las grandes urbes del mundo es un incremento en la demanda de energía, lo cual genera una demanda significativa en el sector de edificios (comerciales, hospitalarios, gubernamentales, etc.) (Ke, Qi, & Qi, 2011) en los que se concentran cientos de personas en jornadas laborales completas. Además, las cambiantes condiciones climáticas, hacen necesario implementar sistemas de aire acondicionado y calefacción para garantizar el confort en las jornadas del trabajo diario. Esta situación ha dado origen a diferentes iniciativas de regulación como las establecidas por las naciones miembros de la Comunidad Europea y los Estados Unidos (Palme, 2010). La Unión Europea implementó en el año 2002 (Jaber-Lopez, 2011) nuevas directrices enfocadas al rendimiento energético en edificios; los países miembros complementaron y ajustaron cada uno sus propias regulaciones para la certificación energética en edificios, y así lograr disminuir el impacto de emisiones de CO<sub>2</sub>. Es así como en España y otros países europeos, existe un Procedimiento Básico para la Certificación en Rendimiento Energético, el cual actualmente es considerado mandatorio para las nuevas estructuras que se construyan.

Con estas acciones correctivas se espera que la demanda de energía proyectada para los años próximos en los países miembros de la OECD (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico), no siga una tendencia creciente. La Figura 1 muestra las tendencias consideradas por la Agencia Internacional de Energía (International Energy Agency) bajo tres escenarios: el corriente (sin políticas de regulación en el consumo de energía), con el nuevo escenario de políticas orientadas a la regulación en el gasto de energía y finalmente bajo el escenario 450 el cual es una política orientada a la disminución de emisiones del CO<sub>2</sub> al medio ambiente promediadas a 450 partículas por millón (International Energy Agency, 2010). Es claro que se estima un ahorro de casi 4 mil millones de toneladas equivalentes de petróleo, lo que deja en evidencia la necesidad de adoptar medidas de ahorro y gestión eficiente de la energía.

La demanda de energía a nivel mundial, está representada principalmente en:

- El sector transporte con un valor proyectado de 26,4 cuatrillones de BTU (13,5 millones de bbl/d) para el año 2040 (U.S. DOE, 2013).
- En el sector industrial la energía consumida se estimó para el 2013 en 24,5 cuatrillones de BTU. Con un crecimiento anual del 0,7% al año 2025 y de un 0,2% del 2025 al 2040 (U.S. DOE, 2013).
- Respecto al sector residencial se espera un crecimiento de 0,3%/año y un crecimiento del 0,6%/año en el sector comercial desde el 2013 hasta el 2040.

Sobre el mismo período, el número total de hogares crecerá 0,8%/Año y el área de espacio comercial 1,0%/año (U.S. DOE, 2013).

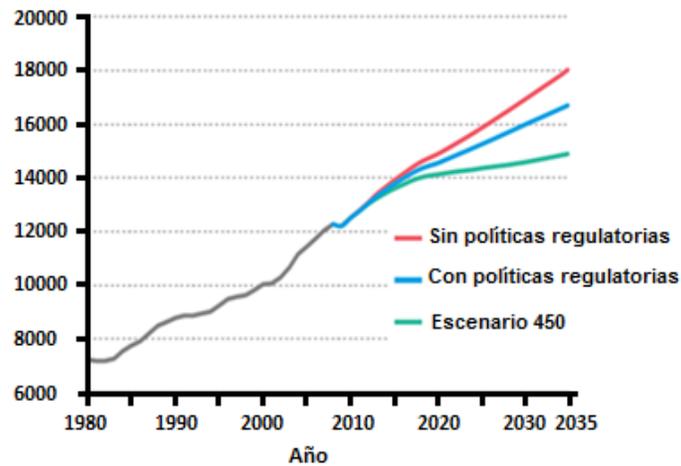


Figura 1. Demanda de energía primaria por escenarios.  
Fuente: (International Energy Agency, 2010)

En esta tesis se hizo enfoque en el sector terciario, el consumo de dicho sector se ilustra en la Figura 2 donde se consideran diferentes usos finales destinados al servicio del sector comercial a nivel mundial (hospitales, centros comerciales, educación, servicios, hospedaje, almacenes, etc.) desde el año 2013 proyectado al año 2040. Es claro como las cargas eléctricas varias y la iluminación tienen un mayor consumo, mientras que el calentamiento de agua tiene un consumo intermedio,

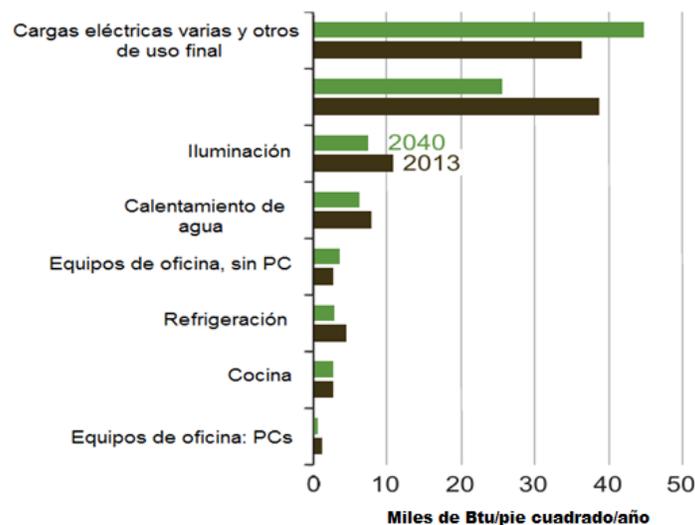


Figura 2. Energía consumida por el sector comercial discriminado para el caso de referencia 2013 y 2040. Fuente: (U.S. DOE, 2013)

El consumo de equipos de oficina (sin incluir computadores) y refrigeración son similares; por otro lado, los equipos de cocina y computadores representan cargas de menor consumo. En Europa, los edificios de servicios, tales como bancos, oficinas y tiendas, representan una cuarta parte del parque inmobiliario. El consumo de energía por metro cuadrado es, por término medio, un 40% superior a los edificios residenciales. El consumo de electricidad es especialmente elevado en sistemas complejos para el alumbrado, el aire acondicionado o la ventilación. Este sector también consume la mayor parte de la refrigeración de espacios de Europa (Comisión Europea, 2016).

En Colombia la energía utilizada en todas las actividades (industria, comercio, residencias, etc.) es suplida por el Sistema Interconectado Nacional (SIN) excepto en las zonas no interconectadas (ZNI). La actual capacidad instalada del SIN es aproximadamente de 14,6 GW, la cual se distribuye así: energía hídrica 64%, energía térmica 31% y otros sistemas (pequeñas hídricas, termales y de viento) 5% (UPME, 2016). Por su parte, la demanda en el país (medida en GWh) tiene un comportamiento que depende del crecimiento de las diferentes actividades del país. En la Figura 3 se muestra la evolución de la demanda desde octubre de 2015 a octubre de 2016, haciendo la comparación, por mes y por año (XM, 2016).

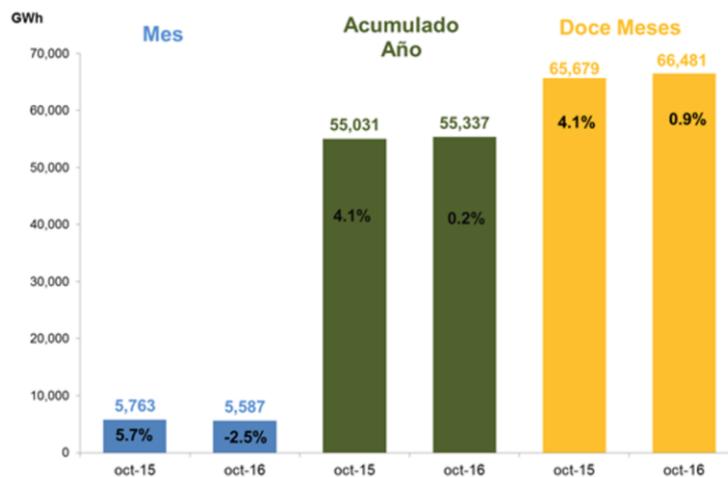


Figura 3. Evolución de la demanda en Colombia. Fuente: (XM, 2016)

Para contextualizar la información mostrada en la Figura 3, la Tabla 1 muestra el comportamiento de la demanda por usuarios (regulados y no regulados). Es de tener en cuenta que la diferencia entre el mercado no regulado y regulado es el nivel de consumo mínimo de energía. Los usuarios no regulados (grandes consumidores

industriales y comerciales) pueden firmar contratos bilaterales con los distribuidores donde se negocian los precios y cantidades libremente entre las dos partes. Los usuarios regulados (consumidores residenciales y pequeños negocios) están sujetos a las disposiciones de la Comisión de Regulación de Energía y Gas, CREG en cuanto a una estructura general de precios (Procolombia, 2015).

Tabla 1. Comportamiento de la demanda por usuarios. Fuente: (XM, 2016)

	Oct. 2015 [GW/h]	Oct. 2016 [GW/h]	Crecimiento [%]	Participación [%]
Regulado	3885,2	3798,1	-1,8	68
No regulado	1849,7	1757,7	-4,4	32
Industrias manufactureras	840,1	797,7	-4,2	45,4
Explotación minas y canteras	395,1	393,3	-0,5	22,4
Servicios sociales y personales	156,2	146,2	-5,8	8,3
Comercio, restaurantes, hoteles	122,7	114,3	-6,4	6,5
Electricidad, gas de ciudad, agua	44,8	30,5	-31,7	1,7
Transporte, almacenamiento y comunicación	32	32,6	2,2	1,9
Agropecuario, caza y pesca	50,5	49	-1,7	2,8
Establecimientos financieros, seguros inmuebles y servicios a las empresas	97,7	90,1	-6,9	5,1
Construcción	110,5	104	-5,6	5,9

En la Figura 4 se muestra la distribución del consumo de energía eléctrica a nivel nacional por sectores en Colombia (UPME, 2016). Se puede evidenciar el impacto significativo de los sectores industrial y comercial, lo que permite definir que es importante considerar el análisis de la eficiencia energética en edificios como una herramienta fundamental en el desarrollo de estrategias de ahorro energético. El potencial de eficiencia energética para usos eléctricos se estima en 25% asociado principalmente a la implementación de buenas prácticas operacionales y a la reconversión tecnológica de sistemas de iluminación, refrigeración, aire acondicionado y algunos sistemas de fuerza motriz (UPME, 2015).

Las ciudades colombianas se encuentran en condiciones climáticas regulares comparadas con ciudades de climas extremos y cambiantes (Norte América, Europa

y algunas de Sur América). Sin embargo, en ciudades como Bogotá, Manizales, Barranquilla y algunas zonas de los llanos orientales, aunque el clima es relativamente estable durante todo el año, se presentan condiciones climáticas diferentes (zonas muy frías, zonas muy calientes y zonas muy húmedas), ocasionando que el consumo de energía presente variaciones significativas. Por tanto, para buscar el mejoramiento de la eficiencia energética, se requieren diferentes parámetros para representar el edificio y todos sus equipos: aire acondicionado y/o calefacción, materiales constructivos y las condiciones climáticas que la zona geográfica del edificio exija. Todos estos sistemas deben operar adecuadamente para lograr la comodidad de los usuarios y también racionalizar los recursos, por esto se hace necesario considerar herramientas que permitan analizar el desempeño energético e implementar acciones que aporten a la eficiencia energética.

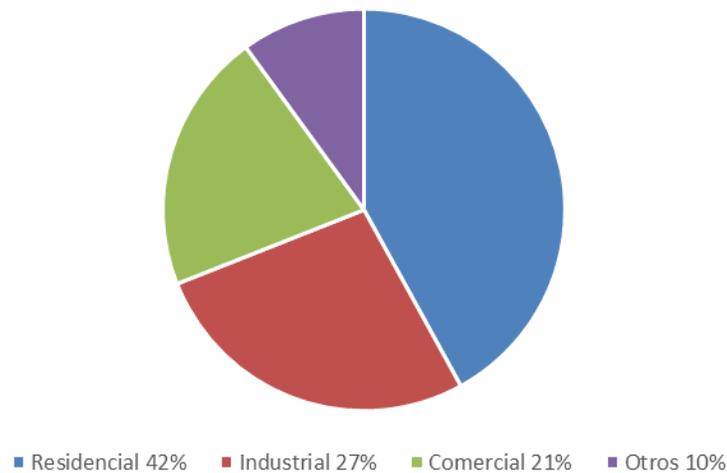


Figura 4. Consumo de energía eléctrica por sectores para el año 2016.

Fuente: (UPME, 2016)

En Colombia, desde el año 2010 el programa de Uso Racional y Eficiente de Energía PROURE señala los principales lineamientos orientados a mejorar la eficiencia energética en todos los sectores involucrados con el uso de la energía eléctrica. De igual forma, dicho programa también incentiva el uso de fuentes y tecnologías no convencionales o renovables (UPME, 2016). Por lo tanto, se identifica nuevamente la importancia de realizar análisis energéticos con el fin de mantener los parámetros de consumo de energía dentro de los rangos establecidos y recomendados por los lineamientos de las autoridades nacionales.

## 2.2 Eficiencia energética en edificios

Como se indicó anteriormente el consumo de energía en edificios terciarios representa una cantidad significativa, lo cual justifica la necesidad de tener un concepto claro sobre el desempeño energético en los edificios y sus implicaciones económicas, energéticas y ambientales. El desempeño energético enfocado hacia la eficiencia energética, es la relación entre la energía consumida y el volumen o cantidad producida o movilizadora (Altmann, 2011). La eficiencia energética implica realizar el mismo trabajo con igual o menos energía y para poder lograr esto, se debe tener en cuenta:

- Reducir las pérdidas de energía
- Aumentar el desempeño energético, es decir, aumentar el trabajo que se obtiene con la misma energía consumida.

La energía en los edificios es usada para varios propósitos: calentamiento e enfriamiento, ventilación, iluminación y el acondicionamiento de aguas calientes sanitarias entre otros. En residencias y edificios comerciales, existen equipos y aplicaciones que requieren energía tales como computadores, cargadores para teléfonos móviles, entre otros. Sin embargo, la identificación de la demanda fija y variable para la energía rara vez aparece en el consumo de la métrica de un edificio, ya que la mayoría de las medidas solo considera la cantidad total consumida por todo el edificio.

La división en el consumo de energía de diferentes fuentes como electricidad y gas, hace que la medición de la energía por sistemas (aparatos de aire acondicionado, electrodomésticos, luces, bombas e instalaciones de calefacción) no sea trivial. Por otro lado, es necesario contar con datos como el tiempo de uso de cada sistema, datos nominales, entre otros. Estos aspectos conllevan a determinar que la medición de la eficiencia sea una labor dispendiosa y tan compleja como lo sea la edificación y sus sistemas (Laustsen, 2008b).

Debido al aumento en costo que se tiene día a día de los combustibles fósiles, como de la energía eléctrica y la misma dependencia de estos, todos los sectores en la industria y gobiernos están empezando a tomar conciencia de la relevancia que tiene ser eficientes energéticamente.

Para el caso de instalaciones nuevas, la eficiencia energética debe ser un factor relevante así como el costo energético operativo a lo largo de todo el ciclo de vida del activo, debiéndose tener en cuenta la implementación de energías alternativas

en las zonas donde pueda aplicarse. En el caso de instalaciones existentes, es importante la implementación de un proyecto para mejorar el desempeño energético de las instalaciones y sistemas de energía existentes, buscando eventuales problemas de diseño existentes y modernización de equipos si es del caso, todo esto soportado en un potencial ahorro energético y económico que pueda justificar la inversión necesaria en las mejoras requeridas.

Otro concepto que es importante mencionar es la eco-eficiencia, desarrollado por el Concejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible (CEMDS) en 1962, el cual se refiere a contribuir al aumento de la prosperidad económica con un uso más eficiente de los recursos y menos generación de emisiones. La eco-eficiencia es obtenida por la entrega de bienes y servicios con precios competitivos que satisfacen las necesidades humanas y traen mayor calidad de vida, con una reducción progresiva en los impactos ambientales de los bienes y servicios a través de todo el ciclo de vida para un nivel como mínimo, acorde con la capacidad estimada para que el planeta pueda soportar.

Conforme al CEMDS, los siete elementos básicos en las prácticas de las compañías que operan de forma eco-eficiente son los siguientes (Madariaga, 2013):

- Reducción de intensidad del material utilizado en la producción de bienes y servicios.
- Reducción de intensidad de la energía utilizada en la producción de bienes y servicios. (Eco-eficiencia energética)
- Reducción en la generación y dispersión de cualquier material tóxico.
- Apoyo al reciclaje.
- Maximización del uso sostenible de los recursos naturales.
- Extensión de la durabilidad de los productos.
- Aumento del nivel de calidad de bienes y servicios.

Uno de los obstáculos para llevar a cabo los objetivos de lograr verdaderos ahorros energéticos y eficiencia en los sistemas de energía en un edificio, es la falta de conocimiento de factores que determina el consumo total y real de energía en un edificio, de igual manera la no socialización de los ocupantes y la falta de administración para una correcta operación (Fabi, Andersen, & Corgnati, 2011).

En los métodos existentes para evaluación energética, se debe tener en cuenta la retroalimentación en medidas y consumos de energía, lo cual involucra toda una metodología a aplicar en aspectos influenciados como clima, ocupación, sistemas

de calor y enfriamiento, así como propiedades de envolvente y geometría del edificio (Chidiac, Catania, Morofsky, & Foo, 2011). Los criterios de desempeño energético y gestión de la energía en una construcción nueva o a modificar pueden ser cuantitativas o cualitativas y pueden dividirse en las categorías representadas en la Figura 5. Por otro lado, hay que tener en cuenta que en las edificaciones nuevas se tienen dos fases de vida: la fase de diseño y la fase de operación. En cada una de ellas se consideran aspectos decisivos para el desempeño energético de la edificación (Kolokotsa, Diakaki, Grigoroudis, Stavrakakis, & Kalaitzakis, 2009).

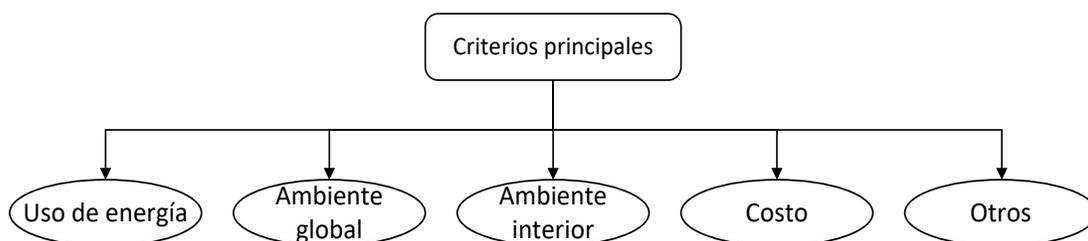


Figura 5. Criterios principales para el desempeño energético y calidad del ambiente en el sector de edificios. Fuente: (Kolokotsa et al., 2009)

En la fase de diseño, el objetivo es lograr el mejor equilibrio entre los parámetros de diseño esenciales frente a un conjunto de criterios que están sujetos a limitaciones específicas. Las variables de diseño esenciales que contribuyen en la energía y del medio ambiente de un edificio influyen en la comodidad de los ocupantes, la demanda de energía en calefacción y refrigeración así como la demanda de iluminación la pueden determinar: la forma del edificio, su orientación, la masa del edificio, el tipo de acristalamiento, y el sombreado (Gero, D’Cruz, & Radford, 1983). Por lo general, el diseñador utiliza modelos de simulación para evaluar los aspectos y soluciones de diseño predefinidas, sujetas a las preferencias subjetivas de los propietarios de la construcción (costo de la construcción, el desempeño energético, la estética, etc.).

En la fase de operación, las decisiones hacia el desempeño energético suelen llevarse a cabo con el apoyo de auditorías energéticas y procedimientos de estudio (Karti, 2000). Las auditorías energéticas pueden variar desde un corto estudio a través de encuestas hasta un análisis detallado de simulación por computador. Cualquier acción en el edificio realizada durante su etapa operativa puede ser de renovación o modificación. En la Figura 6 se muestra el diagrama de flujo del procedimiento para la mejora del desempeño energético de un edificio, del cual se resaltan los siguientes aspectos:

- **Análisis del edificio:** El principal objetivo de este paso es evaluar las características de los sistemas de energía y los patrones de uso de la energía para el edificio. Las características del edificio se pueden recoger en los planos de arquitectura/mecánico/eléctrico y/o de discusiones con los operadores del edificio. Los patrones de uso de energía se pueden obtener de una recopilación de facturas de servicios públicos lo largo de varios años. El análisis de la variación histórica de las facturas de servicios públicos permite determinar si hay efectos estacionales y de tiempo en el uso de energía del edificio.

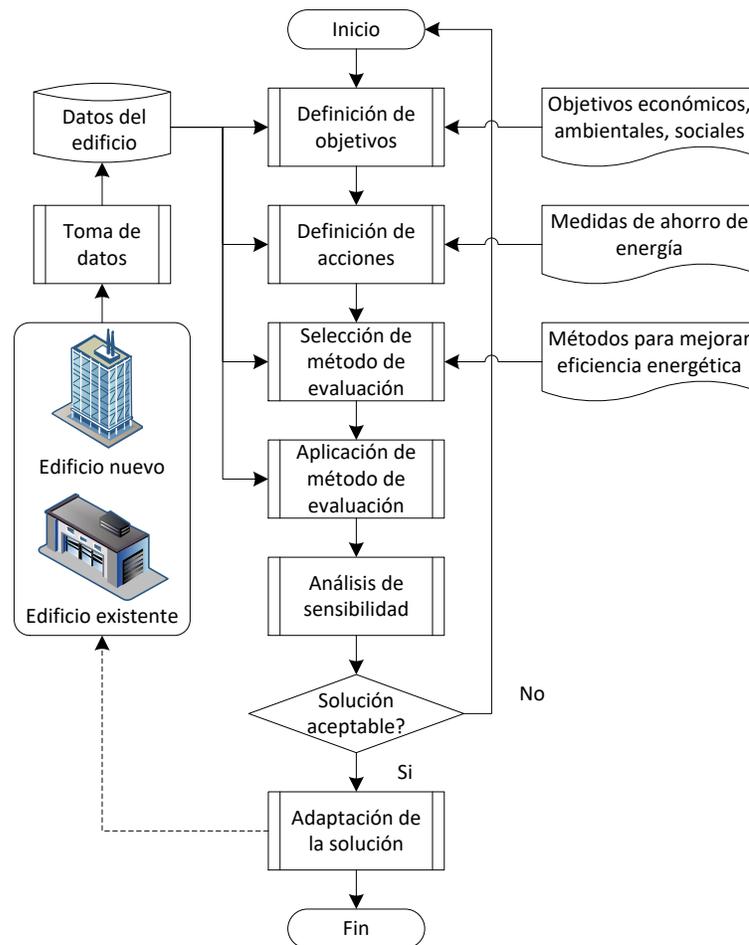


Figura 6. Metodología para la mejora del diseño y operación de edificios.

Fuente: (Kolokotsa, et al. 2009).

- **Estudio inicial:** En esta parte se identifican las posibles medidas de ahorro energético. Los resultados de este paso son importantes ya que determinan si el edificio requiere cualquier otro trabajo de auditoría energética.

- Edificio de referencia: El propósito principal de este paso es desarrollar un modelo del caso base (definido anteriormente como eficiencia técnica), utilizando el análisis de la energía y herramientas de simulación, que representa el uso de la energía existente y las condiciones de funcionamiento del edificio. Este modelo se puede utilizar como una referencia para estimar los ahorros de energía realizados a partir de las medidas de ahorro seleccionadas de manera apropiada.
- Evaluación de las medidas de ahorro de energía: En este paso, se determina una lista de medidas rentables de ahorro de energía usando análisis económico. Se prepara una lista predefinida de las medidas de ahorro de energía. Se evalúan los ahorros de energía, debido a las diversas medidas utilizando el modelo de simulación del caso base. Se estiman los costos iniciales necesarios para aplicar las medidas de ahorro de energía. Se evalúa el costo-efectividad de cada medida de ahorro de energía utilizando un método de análisis económico (recuperación simple o análisis de costo del ciclo de vida).

Independientemente de la fase en que se encuentre un edificio (diseño o funcionamiento), el desempeño energético y la sostenibilidad es un problema complejo. Esto se atribuye principalmente al hecho de que los edificios constan de numerosos subsistemas que se interrelacionan entre sí. Los subsistemas son: envolvente del edificio, iluminación, sistemas HVAC y ACS y en algunos casos energías renovables.

### **2.2.1 Envolvente del edificio**

La arquitectura sostenible y la ingeniería se enfocan en minimizar el tiempo de funcionamiento de los sistemas eléctricos en la estructura disminuyendo el impacto en el medio ambiente. Para este elemento, se deben tener en cuenta aplicaciones de materiales con fases de cambio. Este método tiene dos formas principales de aplicación: pasiva y activa. El sistema de aplicación pasiva puede ser considerado en la envolvente de edificio y así mejorar la respuesta térmica del edificio reduciendo los requerimientos de enfriamiento o calentamiento de aire, además este puede ser integrado en dispositivos con sistemas de almacenamiento de energía, permitiendo el uso de fuentes de energía renovables aportando al desempeño energético de estos sistemas (Mazo, Delgado, Marin, & Zalba, 2012). Otro aspecto a tener en cuenta son los puentes térmicos a través de las capas de aislamiento en la envolvente del edificio lo cual reduce el rendimiento térmico en el conjunto de la

construcción, el flujo de calor que se presenta por estos puentes puede tener un impacto perjudicial sobre todo en el rendimiento energético del edificio (Cianfrone, Norris, Roppel, & Marceau, 2012).

Finalmente, se puede decir que el compromiso de los administradores y/o moradores es importante, ya que una edificación posee una vida útil calculada, y se requiere administración y mantenimiento (Palme, 2010).

### **2.2.2 Iluminación**

La iluminación es uno de los mayores rubros en el consumo de energía en edificios comerciales. El calor generado desde el sistema de iluminación contribuye significativamente a la necesidad de uso y demanda de sistema de enfriamiento en los edificios. El Energy Conservation Building Code (ECBC) recomienda el uso de controles de iluminación (control de encendido/apagado o atenuación de iluminación), como una herramienta para mejorar el uso de sistemas de iluminación y mejorar la eficiencia de estos (Kumar, Kapoor & Bajpai 2009). Por lo tanto, se considera importante hacer uso del desarrollo tecnológico en este campo, implementando sistemas de automatización y control inteligente para optimizar el consumo de energía (teniendo en cuenta horarios, zonas comunes y modernización en las luminarias implementadas, además de la implementación de iluminación natural en el diseño estructural del edificio), siempre bajo los requerimientos de confort requerido y exigido para sus usuarios.

### **2.2.3 Sistemas HVAC y ACS (Calor, ventilación, aire acondicionado y agua caliente sanitaria)**

Haciendo un efectivo control de persianas de sombra, ventilación natural y un uso adecuado de los recursos naturales, se pueden obtener ahorros significativos de energía, todo esto junto con el control en los sistemas HVAC (Van Moeseke, Bruyère, & De Herde, 2007), (Tzempelikos & Athienitis, 2007).

Las estaciones climáticas tanto en Europa como en América hacen necesario implementar tecnologías y métodos para la obtención de agua caliente sanitaria en los edificios (residenciales y comerciales), de esta forma dar un adecuado confort a los usuarios finales de estas estructuras. En las herramientas de simulación energéticas se flexibiliza el uso de calentamiento de agua mediante celdas fotovoltaicas con los intercambiadores de calor. Debido a que en Colombia no se presentan temperaturas extremadamente bajas, el uso de sistemas ACS simplemente se deja como una alternativa tanto en edificios de oficinas como en residenciales.

### **2.2.4 Energías renovables**

Entre todos los sectores estudiados por el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) en su cuarto reporte de evaluación, el sector de edificios tiene un gran potencial para reducir el costo efectivo y emisiones al medio ambiente (proyectado hasta el 2020) basado en tecnologías comercialmente accesibles. Se busca mejorar el desempeño energético, dándose la oportunidad de mitigación más grande y rentable en el uso de energías renovables en el sector de edificios tanto de oficinas como residenciales. Gran parte del potencial para la mejora de la eficiencia energética en edificios permanece sin explotar debido a la existencia de barreras de mercado, tales como la falta de incentivos adecuados y los accesos limitados a la financiación. Los altos costos de algunas tecnologías renovables, también constituyen una barrera para su despliegue en la usencia de subsidios por parte de los estados (Goods & Series, 2010).

Se hace necesario realizar estudios al respecto y que los desarrollos en este campo se masifiquen de tal manera, que los precios queden al alcance y posibilidades de implementar, dada la importancia que toma día a día la necesidad de aprovechar y poder cubrir la demanda en el uso de energía en el mundo. Es así como surge la necesidad después de los años 70 (década de crisis energética) de implementar y desarrollar herramientas que aporten al desempeño energético con énfasis en aplicación de edificios, dado el 40% aproximado de consumo que representa de la energía total consumida en todos los sectores de la economía.

## **2.3 Principales enfoques y metodologías de evaluación para el desempeño energético en edificios**

Según la literatura, se pueden abordar los siguientes enfoques y metodologías para la evaluación del desempeño energético en edificios. Según la política española, la estrategia debe abordar renovaciones exhaustivas y rentables que den lugar a reformas que reduzcan el consumo, tanto de energía suministrada, como de energía final de un edificio, en un porcentaje significativo con respecto a los niveles anteriores a la renovación, dando lugar a un alto rendimiento energético (Ministerio de Fomento de España, 2014). Por su parte, en el caso colombiano actualmente se siguen varios reglamentos que están orientados a garantizar la seguridad en la operación y la eficiencia (UPME,2016), sin embargo, no existen lineamientos concretos acerca de la evaluación del desempeño.

En el sector de la construcción, la fase de evaluación consiste en la evaluación de las acciones predefinidas o estrategias analizadas en opciones y estrategias alternativas frente a los criterios elegidos que se han señalado en los criterios de diseño, en apoyo del desempeño energético y gestión de la energía. El procedimiento de evaluación es un procedimiento iterativo fuertemente influenciado por los criterios, las alternativas, acciones y estrategias y, finalmente por el usuario final. Los enfoques para la mejora del desempeño energético en los edificios se pueden distinguir de acuerdo a sus diferentes características como se muestra en la Figura 7.

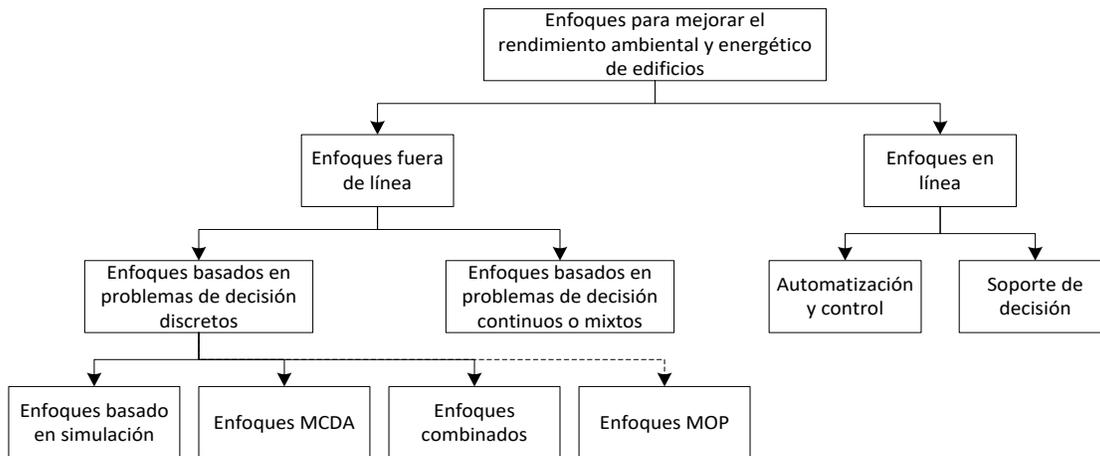


Figura 7. Categorización de enfoques metodológicos para la mejora del desempeño energético en edificios. Fuente: (Kolokotsa, et al. 2009)

Dependiendo de cómo se lleva a cabo la aproximación, se pueden distinguir en enfoques fuera de línea y en línea. Los enfoques fuera de línea tienen como objetivo identificar las medidas particulares, tales como materiales de aislamiento, la construcción de la pared, tipo de caldera, etc., que se espera lleve a una mejora energética de los edificios y del desempeño ambiental. Estos enfoques pueden aplicarse durante la fase de diseño o en el marco de una renovación o reacondicionamiento durante la fase de operación del edificio. Los enfoques fuera de línea no interactúan con el edificio en tiempo real. Los enfoques en línea tienen como objetivo identificar los parámetros específicos, como puntos de referencia, estrategias de control (reducción nocturna, compensación, etc.), con base en mediciones en tiempo real obtenidas a través de un sistema de gestión de la energía (SGE) que mejora el desempeño energético del edificio durante su operación en tiempo real.

### **2.3.1 Enfoques en línea**

En la fase de operación de un edificio, con el enfoque en línea la evaluación del desempeño energético se logra mediante la recolección de datos con el SGE que posteriormente permite tomar decisiones que puedan contribuir a una reducción significativa del consumo energético y la mejora del confort interior a través de las técnicas de control avanzado (Kolokotsa et al., 2005). Los sistemas de control modernos proporcionan un funcionamiento optimizado de los sistemas de energía al tiempo que satisfacen el confort interior. Los recientes desarrollos tecnológicos basados en técnicas de inteligencia artificial (redes neuronales, lógica difusa, redes neuronales, etc.) ofrecen varias ventajas en comparación con los sistemas de control clásicos. Kolokotsa (2007) realizó una revisión de la contribución de la lógica difusa en la regulación del confort interior, así como el control de climatización y el desempeño energético, mientras que Kalogirou (2006) analizó el papel de las redes neuronales en los edificios. Ma, Wang, Xu, & Xiao (2008) presentaron una estrategia de control de la operación y supervisión de un edificio basada en modelos para el control en línea.

### **2.3.2 Enfoques fuera de línea**

Los enfoques fuera de línea se aplican a problemas de decisión formulados en forma discreta, continua o mixta (discretos y continuos). La formulación del problema se realiza de acuerdo a la forma en la que se consideran las diferentes alternativas o estrategias disponibles (Gero et al., 1983).

#### ***Enfoques basados en problemas de decisión continuos o mixtos***

En los enfoques basados en problemas de decisión discretos, todo el proceso, así como las decisiones finales, se ven afectadas de manera significativa por la experiencia y el conocimiento del experto en construcción correspondiente o la toma de decisiones. A pesar de que esta experiencia y el conocimiento son sin duda elementos importantes e irremplazables en todo el proceso, es necesario el desarrollo de herramientas prácticas que ayuden a tomar en cuenta el mayor número posible de alternativas viables y criterios de decisión, sin las restricciones impuestas por las acciones o estrategias predefinidas. Para superar esta deficiencia de los planteamientos de problemas de decisión discretos, surgieron los enfoques a problemas de decisión continuos o mixtos. Estos últimos enfoques se basan fundamentalmente en los conceptos de técnicas MOP (Multi-objective programming), un área científica que ofrece una amplia variedad de métodos con un gran potencial para la solución de los problemas de decisión complejos. La característica principal de este enfoque es que se toma en cuenta todo el posible conjunto de posibles medidas.

***Enfoques basados en problemas de decisión discretos***

En este caso, los enfoques se cumplen en una alta posibilidad, pero en cualquier caso se considera un conjunto de posibles acciones o estrategias discretas y definitivas.

***Enfoques basados en análisis de decisión multi criterio (MCDA):***

Los enfoques basados en MCDA son usualmente utilizados para apoyar la síntesis de las acciones posibles e incluye áreas como la teoría de la utilidad multi atributo y los métodos fuera de rango. Por otra parte, el MCDA apoya la inclusión de aspectos subjetivos a través de las preferencias de los tomadores de decisiones que influyen en el proceso de decisión. En el proceso de diseño del edificio, el MCDA es utilizado por (Gero et al., 1983) para evaluar la orientación óptima, fracción de ventana, etc. frente a los costos de capital, zona que se utiliza y la tasa total de la carga térmica, y por (Jedrzejuk & Marks, 2002) para encontrar la solución óptima para la forma de construcción, tabiques interiores y la optimización de las fuentes de calor para bloques de viviendas, usando un procedimiento iterativo. En la etapa de operación y modernización, el MCDA se introdujo por varios investigadores. Métodos combinatorios y fuera de rango son utilizados por (Blondeau, Spérandio, & Allard, 2002) para evaluar la calidad del aire interior, confort térmico y el consumo de energía.

***Enfoques combinados:***

En (Alanne, Salo, Saari, & Gustafsson, 2007) se introduce la decisión combinatoria multicriterio para abordar el problema de reconversión y renovación. Por otro lado, Alanne et. al., utiliza el MCDA para extraer las utilidades de las acciones de renovación propuestas, así como la utilidad total en comparación con los criterios seleccionados.

***Enfoques basados en programación multi objetivo (MOP):***

La decisión multi objetivo ayuda a tratar con modelos matemáticos, incluyendo más de una función objetivo (Mavrotas, Diakoulaki, Florios, & Georgiou, 2008). Como consecuencia de la optimización del vector, los problemas multi objetivo no proporcionan una única solución óptima. La razón principal es que una solución "ideal" que optimice todas las funciones objetivo, al mismo tiempo, rara vez es posible.

*Enfoques basados en simulación:*

Pueden ser simplificados (métodos analíticos) o detallados (métodos numéricos), utilizando programas de simulación de gran alcance (Clarke, Hensen, & Janák, 1998). En el proceso basado en simulación, se desarrolla un modelo básico utilizando herramientas de simulación. Luego, a través de un procedimiento iterativo, se definen una serie de recomendaciones mediante el análisis de la simulación de energía con el fin de llevar el edificio desde una construcción típica a una construcción de mejores prácticas (Horsley, France, & Quatermass, 2003). Estas recomendaciones pueden incluir aumento del aislamiento, uso de acristalamientos innovadores de alta eficiencia, cambio de la forma del edificio y de las relaciones de aspecto, etc. Las principales herramientas de simulación para el análisis de la energía son EnergyPlus, eQUEST, TRNSYS, DOE-2, BLAST, ESP-r, entre otras.

**2.4 Simulación del desempeño energético en edificios**

A partir de los años 70, las herramientas de simulación del desempeño energético se enfocaron hacia la optimización del consumo de la energía en todos los sectores productivos en los países desarrollados y se fueron convirtiendo en un compromiso para los países en crecimiento. En el sector de edificios hay un foco especial en las herramientas de desempeño energético, ya que como se indicó anteriormente, en este sector está representado el consumo del 40% del total de la energía generada en los países desarrollados.

Existen más de 389 paquetes de simulación de desempeño energético (BPS por sus siglas en inglés Building Performance Simulation), lo cual indica un crecimiento importante de este tipo de herramientas (Attia, Hensen, Beltrán, & De Herde, 2012). De esta forma, arquitectos e ingenieros tienen la posibilidad de realizar análisis enfocados a uno de los sub sistemas (iluminación, HVAC y ACS, energías renovables o envoltorio del edificio) o análisis globales que abarcan todos los sub sistemas en una sola herramienta.

Dada la amplitud de opciones de las herramientas de BPS, no hay una evaluación independiente para clasificar la funcionalidad de la herramienta en relación con los diferentes tipos de usuarios y necesidades específicas, además los desarrolladores de herramientas raramente indican las capacidades y limitaciones de estas, el usuario se enfrenta a la dificultad de elegir entre las diversas herramientas existentes (Attia et al., 2012). El usuario no tiene claro los criterios

para clasificar y evaluar las ventajas ofrecidas por las herramientas (Crawley, Hand, Kummert, & Griffith, 2008), además no hay un lenguaje común para definir que herramienta se puede usar, estos criterios se deben de elaborar mediante búsquedas exhaustivas en las que se realicen comparativos de características en nivel de detalle, modelamiento general, cargas térmicas, envolturas del edificio, luz natural y solar, infiltración, ventilación, flujos de aire por múltiples zonas, sistemas de energías renovables, equipos y sistemas eléctricos, sistemas HVAC, evaluación en la contaminación al ambiente, evaluación económica, disponibilidad de datos climáticos, reporte de resultados, validación, interfaces hacia otros programas (Crawley, Hand, Kummert, & Griffith, 2005), además de la posibilidad de ser una herramienta de licencia libre.

Dados estos criterios, las herramientas de desempeño energético, se clasifican de acuerdo a las características de las necesidades puntuales del potencial usuario: simulación de un sub sistema o una simulación global.

#### 2.4.1 Herramientas de simulación energética por subsistema

Tal como se indicó en forma general en el numeral 2.2 una edificación se conforma de diferentes sistemas, entre ellos la envolvente, iluminación, HVAC, entre otros. Por tanto, vale la pena conocer algunas herramientas orientadas particularmente a solo uno de dichos sub sistemas:

Herramientas para Sistemas HVAC (Heating- Ventilation- Air Conditioner): Entre las herramientas para simular este tipo de subsistema se encuentran: CoolPack, BITZE, Refrigeration Load Calculator y DanCap. En la Tabla 2 se presentan un resumen de las herramientas.

Tabla 2. Principales características de herramientas de simulación para sistemas HVAC.  
Fuente: Autor

Nombre	Creador	Precio (USD)	Aplicaciones	Características
CoolPack (DTU, 2017)	Universidad Técnica de Dinamarca Grupo	0	Análisis de ciclo, dimensionamiento de componentes	Conjunto de modelos de sistemas de refrigeración.
BITZER (Bitzer, 2017)	empresarial BITZER - Alemania	0	Compresores, sistemas booster.	Aplicación on-line con varios modelos que pueden ser caracterizados por el usuario.
Refrigeration Load Calculator	Emerson Climate Technologies	0	Dimensionamiento de sistemas de refrigeración	Motor de cálculo con bases de datos establecidas con interfaz incluida

(Emerson, 2017)	– Estados Unidos			
DanCap (Danfoss, 2017)	Danfoss - Dinamarca	0	Selección de tubos capilares	Simula dispositivos de estrangulación de tubo capilar para sistemas de refrigeración

Herramientas para iluminación: Estas herramientas es un medio práctico cuando se tiene la necesidad de simular diseños de iluminación en espacios o vías públicas. Las siguientes herramientas son gratuitas y se han consolidado como opciones de gran utilidad: DiaLux y Relux Professional. Sin embargo, existen otras herramientas no gratuitas que pueden ser consideradas. En la Tabla 3 se presenta un resumen con las principales características de las herramientas para simulación de sistemas de iluminación.

Tabla 3. Principales características de herramientas de simulación para iluminación.  
Fuente: Autor

Nombre	Creador	Precio (USD)	Aplicaciones	Características
Dialux (DIAL, 2017)	DIAL GmbH Alemania	0	Interior, exterior, Vialidades, Espacios abiertos, evaluación energética	Diseño 3D, Catálogos de iluminación, acabados, muebles, entre otros, archivos CAD, fotometrías electrónicas
ReluxPro (Relux, 2017)	Relux Ingormatic AG. Suiza	0	Interior, exterior, Vialidades, espacios abiertos, luz de día	Diseño 3D, archivos CAD, fotometrías electrónicas, cuenta con venta de módulos complementarios
Visual Lighting (Acuity, 2017)	Acuity Brands	150	Interior, exterior, vías, espacios abiertos	Diseño 3D, archivos CAD, fotometrías electrónicas
Luxicon (Eaton, 2017)	Cooper Crouse Hinds Estados Unidos	200	Interior, exterior, Vialidades, Espacios abiertos, luz de día	Archivos CAD, fotometrías electrónicas IES, resultados 3D
AutoLUX (ITL, 2017)	Independent Testing Laboratories, Inc. E.U	979	Interior, exterior, Vialidades, Espacios abiertos	Diseño 3D, Archivos CAD, Fotometrías electrónicas
Litestar 4D (OxyTech, 2017)	Oxy Tech Italia	2085	Interior, exterior, Vialidades, Espacios abiertos	Diseño 3D, Archivos CAD, Fotometrías electrónicas, cuenta con una versión gratuita.

Herramientas para energías alternativas: Se destacan principalmente PVGIS y RETScreen. En la Tabla 4 se presentan sus principales características.

Tabla 4. Principales características de herramientas de simulación para sistemas HVAC.

Fuente: Autor

Nombre	Creador	Precio (USD)	Aplicaciones	Características
PVGIS (Joint Research Centre, 2017)	Centro común de investigación – Unión Europea	0	Sistemas fotovoltaicos	Herramienta en línea que permite estimar la generación en sistemas fotovoltaicos por año
RETScreen (Natural Resources, 2017)	Natural resources – Gobierno de Canadá	900	Sistemas fotovoltaicos, eólicos y térmicos	Permite diseñar y hacer evaluaciones anuales de la generación de energía en sistemas fotovoltaicos, eólicos y térmicos.

#### 2.4.2 Herramientas integrales de simulación de desempeño energético en edificios

En este capítulo se han introducido los principales aspectos relativos a la eficiencia energética en edificios y de allí se ha podido identificar la importancia del uso de herramientas para conocer con exactitud el desempeño energético en este tipo de espacios. Las herramientas de simulación de desempeño energético se pueden utilizar tanto en la etapa previa de diseño como en la etapa de implementación de los sistemas de energía del edificio e incluso se pueden utilizar una vez terminada la implementación con el fin de realizar labores de monitoreo y continua evaluación de la eficiencia.

Más del 80% del total de energía utilizada en el ciclo de vida de los edificios es consumida en la etapa de operación. Esto hace necesario que desde la etapa de diseño, selección y dimensionamiento de los sistemas mecánicos y eléctricos relacionados con los sub sistemas que tendrá el edificio (sistemas de iluminación, envolvente, elementos de sombra, orientación, diseño del edificio, sus potenciales fuentes de energías alternativas y sistemas HVAC, etc.) se tomen decisiones certeras. De esto depende que a lo largo del tiempo se obtengan verdaderos ahorros energéticos. Para este propósito los programas de modelamiento de energía “integrales” como eQuest, EnergyPlus, IES, Energy-10, CALENER GT, TRNSYS, entre otros han sido ampliamente usados por arquitectos e ingenieros para simular y predecir el rendimiento de energía desde su etapa de diseño y

analizar las mejores opciones de todos los sistemas que componen el edificio (Azar & Menassa, 2012).

Existen muchos aspectos que caracterizan las herramientas de desempeño energético y que ayudan a enfocar al usuario según sus necesidades. Sin embargo, hay aspectos genéricos que marcan la diferencia, por ejemplo, programas con licencia gratis o de paga, robustez y capacidad de cálculo. En general se deben tener en cuenta según (Attia, 2011) cinco criterios que incluyen: usabilidad y administración de la información de interface, optimización, interoperabilidad, precisión e integración en procesos de diseño para simular componentes complejos de edificios en detalle (es decir, capacidad de integrar sub sistemas en una sola herramienta) y finalmente inteligencia e integración del conocimiento base de diseño, además los resultados y su facilidad de interpretación determinan sus limitantes en los objetivos de aplicación.

En diferentes países del mundo el tema de herramientas de simulación energética ha ido evolucionando en forma muy asimétrica, es así como en Europa no se dispone de una organización globalizada que centralice y aúne el esfuerzo para el desarrollo de este tipo de software. Lo que existe son diversos programas con enfoques también muy diversos: con licencia, libres, versiones limitadas, etc. Son realizados por algunos países como (Casal, 2015):

- Dinamarca: BSIM del Instituto Danés para la investigación en edificios.
- Inglaterra: ESP-r de la universidad de Strathclyde, en Glasgow, cuyo código es abierto.
- Suecia: IDA-ICE es un programa comercial con un motor de simulación común y módulos con diversas aplicaciones (para el caso de edificios dicho módulo es el ICE-Indoor Climate and Energy).

A continuación, se describen algunas herramientas o programas de simulación energética de mayor influencia en Europa, Canadá y Estados Unidos, los cuales tienen diferentes características y usos que permiten la aplicación de acuerdo a los requerimientos, aplicabilidad y nivel de precisión que el usuario esté buscando.

#### *CALENER VYP, CALENER GT, PostCALENER, CE3 y CE3X*

Son herramientas utilizadas para certificación energética en España. CALENER VYP, es un programa informático especialmente desarrollado para certificación energética en edificios de viviendas y del pequeño y mediano terciario. CALENER GT es una herramienta para la calificación de eficiencia energética de grandes edificios del sector terciario. Sin embargo, teniendo en cuenta que CALENER GT

es una herramienta que también realiza un proceso de cálculo que permite conocer la evaluación energética de un edificio terciario, se incluyó como una de las herramientas a analizar en esta tesis.

PostCALENER, permite el tratamiento de componentes, estrategias o equipos no incluidos en los procedimientos originales para CALENER e integración con el mismo (Casal, 2015).

CALENER continúa siendo la herramienta de referencia para la certificación energética de edificios existentes en España, aún con una serie de limitaciones que hacen aconsejable el desarrollo de procedimientos específicos para edificios existentes, así para superar estas limitaciones se hace necesario tener en cuenta:

- Nueva escala de certificación energética en edificios existentes: Se ha desarrollado una nueva escala de calificación energética para edificios existentes. El objetivo de este documento es la obtención de los valores medios y las dispersiones de los indicadores para el parque de edificios de viviendas existente, que permitan obtener el rango completo de la escala de eficiencia energética
- Implementación de procedimientos simplificados: se encuentran dos herramientas simplificadas el CE3 y CE3X, los cuales poseen validez en el mismo rango de edificios: viviendas, pequeño, mediano y gran terciario, programas desarrollados por autores diferentes, las diferencias principales radican en la forma de incorporar los datos, permitiendo CE3 un mayor número de opciones, incluso, pudiendo importar la geometría del programa LIDER y mejora el procedimiento en tratar las medidas de mejora en el simulación (Casal, 2015).

Otra herramienta informática para el desempeño energético como procedimiento simplificado para la certificación de eficiencia energética en edificios de viviendas en España en el CERMA. Esta aplicación gratuita de diseño y de predicción de la calificación de eficiencia energética ofrece un estudio detallado para mejorar la calificación obtenida. Fue desarrollado por ATECYR (Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración) y el Instituto Valenciano de la Edificación (Casal, 2015).

#### *Transient System Simulation Program (TRNSYS)*

Ha sido desarrollado por el Solar Energy Laboratory of Wisconsin- Madison- USA, es utilizado para estudiar el funcionamiento de sistemas de calentamiento de agua,

calefacción de edificios, etc. Una de las características del programa es su estructura modular ya que posee un conjunto de módulos variados que al ser interconectados entre sí, brinda información sobre el funcionamiento del sistema en su totalidad como también en cada uno de los componentes del mismo, y presenta la ventaja de ser un programa flexible, es decir se puede escribir una sub-rutina usando el lenguaje FORTRAN y anexarlo a los módulos ya existentes.

TRNSYS también cuenta con una utilidad que permite, conociendo la composición de los muros de una edificación (número de capas, materiales, tipo de espesor de cada capa, etc.) calcular una serie de coeficientes de transferencia de calor correspondientes. Estos se utilizan en la definición de la zonas, proporcionando mayor realismo al modelo (Madera, 2006).

Además, se utiliza para simular sistemas de edificio mono o multi zonas, se caracteriza por no tener herramienta de diseño o de visualización del edificio propia. Por otro lado, tiene la versatilidad de permitir adicionar ecuaciones y modificar las metodologías de cálculo. Los resultados por defecto son la evolución de la temperatura interior de las zonas a simular a lo largo del año y la demanda energética correspondiente, sensible y latente, siendo posible además obtener muchos más parámetros de salida.

### *eQUEST*

Es una herramienta de protocolo abierto de origen estadounidense creado por el DOE y cuya primera versión se conoce como DOE-2.2. Está diseñado para proveer un análisis de rendimiento en todo un edificio, enfocado para constructores, propietarios, diseñadores y operadores de edificios, autoridades en regulación y utilidad en energía, también para el área de educación. En el análisis del edificio en conjunto se reconoce que en el edificio hay un conjunto de sistemas y que el diseño sensible a la energía es un proceso creativo en el que se debe de integrar el rendimiento de los sistemas que interactúan para un buen confort en el uso del edificio, integración de sistemas como envolvente de edificio, filtraciones, iluminación, sistemas HVAC y DHW (Domestic Hot Water).

Por lo tanto, en cualquier análisis de las consecuencias de rendimiento de estos sistemas integrados, se deben tener en cuenta las interacciones entre ellos, de tal manera que todas en conjunto sean accesibles y comprensibles (es decir, el modelo, la preparación del tiempo, tiempos de simulación, resultados e informes finales). Hay dos partes principales en la herramienta de simulación:

- Los asistentes o wizards (para análisis de creación del edificio y EEM- Energy Efficiency Measures).
- Interface detallada, incluyendo resultados y reportes.

Asistentes (Wizards): está concebido para simplificar y agilizar el proceso de preparación del modelo del edificio para el análisis de simulación, comparado con herramientas de simulación convencional, este requiere pocos parámetros del usuario. Combinando entradas limitadas con dinámicas inteligentes por defecto, los asistentes del eQUEST puede ser usado en dos maneras: para llevar a cabo la realización esquemática de análisis, es decir esquemas preliminares o agilizar la preparación de modelos más detallados para análisis más profundos. Normalmente, eQUEST cuenta con tres tipos de desarrollo rápido: el “SD Wizard” (Schematic Design Wizard), el “DD Wizard” (Design Development Wizard) y el EEM Wizard (Energy Efficiency Measures Wizard).

El SDW y el DDW, son usados para crear modelos de edificios, el EEMW, es utilizado para crear alternativas de diseño en edificios. Hay dos diferencias principales entre el SDW y el DDW:

- SDW, puede solamente crear sobre la envoltura de un solo edificio al tiempo, esto se refiere a alguna área del edificio que comparte los mismos sistemas: zonas HVAC, alturas de cielo, tipo de envolvente del edificio (materiales, etc.) y tipo de servicios HVAC. el DDW ser usado para crear edificios que requieren múltiples cubiertas.
- El SDW, puede crear en plantilla hasta dos tipos de sistemas HVAC (desde el cual uno o más sistemas HVAC podrá ser creado en su modelo). El DDW puede ser creado para crear muchos tipos de sistemas HVAC y provee mucha más flexibilidad en el asignamiento de sus áreas, por estas razones es mucho más usado. El usuario puede iniciar un proyecto en SDW y en cualquier momento migrarlo a DDW más aún, el sistema no permite realizar la conversión inversa, es decir de DDW a SDW.

El análisis EEM, es el principal uso para eQUEST, su función es evaluar el rendimiento del uso de energía y sus impactos en la simulación de sistemas en edificios (Hirsch, 2009).

### *CAN-QUEST*

Es la versión canadiense derivada del eQUEST. Las principales adiciones para CAN-QUEST relativas a eQUEST, son un soporte para el sistema internacional de medidas y la opción del uso de lenguaje francés y análisis de compilación para el

Código de Energía Nacional de Canadá para edificios del 2011. CAN-QUEST acopla una creación rápida inteligente derivada del motor de simulación DOE-2.2 y provee un poderoso motor de reporte gráfico que permite mostrar resultados de simulación detallados tanto como para arranques de simulación en edificios individuales como de múltiples proyectos. Algunas capacidades adicionales incluyen:

- Complejas geometrías de edificios en cuestión de minutos, mediante la selección de perfiles de edificios predefinidos con dimensiones adaptables.
- Sofisticados mecanismos por defecto que permiten solo la descripción del edificio como se desee, produciendo modelos detallados en minutos.
- Alto nivel en descripción de información del edificio, incluyendo tipos de edificios y sus múltiples “áreas de actividad” que son útiles en muchos valores por defecto en modelos para “ajuste fino”.
- Reportes gráficos de salida personalizados simples y múltiples para comparación de simulaciones simultáneas, a través de “Multiple user-selected” iniciado.

CAN-QUEST, ofrece un reporte de cumplimiento que puede ser usado para trámites de cumplimiento con el NECB (National Code Energy for Building).

### *Energy Plus*

Es una herramienta que tiene sus raíces basadas en los programas BLAST y DOE-2, BLAST (Building Loads Analysis System Thermodynamics) y DOE-2 fueron desarrollados y mejoradas entre los años 70 y 80 como herramientas de simulación energética. Está orientado hacia ingenieros diseñadores o arquitectos que desean dimensionar sus equipos HVAC apropiadamente, desarrollar estudios de reconversión para los análisis de costo de ciclo de vida, optimizar el rendimiento de la energía, etc. Nacido de las preocupaciones impulsadas por la crisis energética de la década de 1970 y el reconocimiento de que en la construcción el consumo de energía es un componente importante de las estadísticas de uso de energía de América, los dos programas intentaron resolver el mismo problema desde dos puntos de vista ligeramente diferentes (EnergyPlus, 2016).

Al igual que sus programas padres, EnergyPlus es un programa de simulación para análisis de energía de cargas térmicas. Basándose en la descripción de un usuario de un edificio a partir de la perspectiva de la constitución física del edificio, los sistemas mecánicos asociados, etc. EnergyPlus calcula la calefacción y cargas necesarias de enfriamiento para mantener los puntos de ajuste de control térmico,

las condiciones a lo largo de un sistema de climatización secundaria y sus baterías de cargas de consumo.

Además, el consumo de energía de los equipos de la planta principal, así como muchos otros detalles de simulación que son necesarios para verificar que la simulación está funcionando como el edificio real sería. Muchas de las características de simulación se han heredado de los programas tradicionales de BLAST y DOE-2, en la siguiente lista se presentan algunas de las características y de las primeras mejoras de EnergyPlus, con esta lista se transmite una idea del rigor y aplicabilidad de EnergyPlus a varias situaciones de simulación (U.S. DOE, 2016):

- Simulación simultánea integrada: donde las respuestas de los sistemas primarios y secundarios del edificio están estrechamente acopladas, por fracciones de hora incluso cuando es necesario.
- Pasos cortos de tiempos (Fracciones de hora), definibles por el usuario: para la interacción entre de las zonas térmicas y los sistemas HVAC.
- Clima basado archivos de texto, archivos de entrada-salida: que incluye condiciones ambientales fraccionadas en horas y minutos, además de reportes estándar definibles por el usuario respectivamente.
- Solución basada en balance de calor: Técnicas para cargas térmicas en edificios que permiten cálculos simultáneos de efectos de radiación y convección tanto en las superficies del interior como del exterior durante cada fracción de tiempo.
- Conducción de calor Transitorio: a través de elementos del edificio, así como paredes, techos, pisos, etc. usando las funciones de transferencia de conducción.
- Mejorado el modelo de transferencia de calor a tierra: mediante enlaces a modelos tridimensionales del terreno de diferencias finitas y técnicas de análisis simplificado.
- Calor combinado y transferencia de masa: modelo de que da cuenta de la humedad de adsorción/desorción ya sea como una integración capa por capa en las funciones de transferencia de conducción o como un modelo de profundidad de penetración de humedad efectiva.
- Modelo de confort térmico: basado en actividad interior, bulbo seco, humedad, etc.
- Modelo aniso trópico de cielo: para mejorar el cálculo avanzado de la energía solar difusa en superficies inclinadas.

- Cálculos avanzados de fenestración: incluyendo controles de persianas, acristalamientos electro crónicos, balances térmicos capa por capa que permiten la asignación adecuada de la energía solar absorbida por cristales de las ventanas, y una biblioteca de rendimiento para numerosas ventanas de iluminación natural disponible en el mercado.
- Controles de iluminación natural: incluyendo cálculos de iluminación interior, simulación de deslumbramiento y de control, controles de luminarias y efecto de la reducción de la iluminación artificial en el lazo calefacción y refrigeración.
- Lasos basados en sistemas HVAC configurables: (radiante y convencional) que permite al usuario modelar sistemas típicos y ligeramente modificados sin compilar el código fuente del programa.
- Cálculo de la contaminación atmosférica: predice los niveles de CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, niveles de partículas y producción de hidrocarburos tanto en sitio como la conversión de energía remota.
- Enlaza a otros componentes/ambientes de simulación populares: Así como Windows y DELight para permitir más análisis detallado en componentes del edificio.

Es importante tener en cuenta que EnergyPlus no cuenta con una interfaz de usuario; está destinado a ser un motor de cálculo alrededor del cual otras interfaces pueden ser enlazadas para facilitar su uso. Normalmente EnergyPlus se asocia con Sketchup para la definición de los parámetros arquitectónicos y con OpenStudio para la configuración de la simulación y visualización de resultados. Si no se utiliza ninguna herramienta adicional, tanto los datos de entrada como los de salida se manejan como archivos de texto simple.



## **3. Metodología**

Para el uso de cualquier herramienta de evaluación del desempeño energético, es necesario analizar cómo funciona, qué tipo de información requiere, qué sistema de unidades maneja, cómo arroja los resultados, requerimientos informáticos, entre otros aspectos. De esta forma se garantiza que la herramienta sea utilizada de forma adecuada y que los resultados estarán acordes con la situación que se quiere estudiar. En este capítulo se presentan los conceptos relacionados con la selección y aplicabilidad de algunas herramientas de evaluación de desempeño energético y el procedimiento general para su uso. Por otro lado, se definen las herramientas que se utilizarán en el caso de estudio de este trabajo, del cual se presentan las características constructivas y energéticas. Y finalmente, se comentarán las medidas evaluadas en el caso de estudio, las cuales serán analizadas en el siguiente capítulo.

### **3.1 Criterios a tener en cuenta para la selección de las herramientas de evaluación de desempeño energético**

La evaluación energética en cualquier tipo de edificación (industrial, comercial, residencial, hospitalaria, etc.), es determinante para definir y predecir el consumo de energía y por tanto identificar las estrategias de ahorro y uso eficiente que se puedan implementar. Para llevar a cabo una evaluación energética detallada es necesario contar con toda la información de la edificación: ubicación geográfica, clima del entorno, características de los sistemas de iluminación, sistemas HVAC y ACS, uso de energías renovables, entre otras. Para enfrentar el reto de desarrollar una evaluación energética precisa, se han desarrollado herramientas de simulación y/o desempeño energético. Se clasifican entre muchas características por su tipo de licencia de uso, evolución, robustez, tipo de edificios para su aplicación (uso comercial, industrial, hospitalario, oficinas, vivienda, etc.).

En el proceso de selección de la herramienta más adecuada para la simulación del desempeño energético en edificios para el caso colombiano, se tendrán en cuenta aspectos como tipo de licencia, robustez de la herramienta y popularidad. Además, se considerarán los criterios que se describen a continuación.

### **3.1.1 Uso de la energía**

La evaluación del adecuado uso de la energía por parte de las herramientas de simulación en desempeño energético, es muy sensible ya que tiene que ver directamente con el estado de comodidad de los usuarios y del uso racional y eficiente de la energía (Palme, 2010). Estas condiciones exigen en las herramientas de simulación tener la capacidad de evaluar con precisión tanto el calor necesario en invierno como la climatización requerida en verano, sostener el equilibrio de precisión en sus motores de cálculo en el óptimo uso de consumo de energía y el equilibrio financiero.

La herramienta para el caso Colombiano debe tener la flexibilidad en variables a evaluar en el proceso de simulación como clima exterior e interior, emisiones de gases de efecto invernadero, análisis financieros, amplias bases de datos de equipos para sistemas HVAC, que permita enlazar desde las bases de datos de la ASHRAE (American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers), capacidad en la simulación del uso de energías alternativas en el diseño del edificio cuando la zona y el entorno climático así lo permita, etc.

### **3.1.2 Ambiente global**

Las estimaciones de las demandas de energía y su impacto en el medio ambiente interior, están determinadas por una serie de factores, los cuales actúan de distinta manera, impactando en la transferencia de energía y masa en la composición de la envolvente del edificio. Las tres principales fuentes pueden ser identificadas como:

- Ambiente exterior o clima (refiriéndose a construcciones, las principales variables que se afectan son: temperatura del aire, temperatura del cielo radiante, humedad, radiación solar, velocidad y dirección del viento).
- Los ocupantes causan ganancias ocasionales de calor por su metabolismo, el uso de electrodomésticos, aparatos de oficina, iluminación, etc.
- Sistemas auxiliares que cumplen las funciones de calefacción, ventilación, aire acondicionado (sistemas HVAC).

La selección de las series de tiempo climáticas, para proporcionar condiciones apropiadas para la simulación, requiere de un gran cuidado, es por ello que lo fundamental es la tipicidad de la colección de datos en relación con el clima que

define el sitio en estudio (González & Díaz, 2013). De acuerdo a lo anterior, entre las herramientas que se seleccionen deben de tener la flexibilidad para enlazar los archivos climáticos que se requieran de acuerdo al lugar que se realice la simulación, este aspecto es importante para tener resultados con un nivel de precisión acorde a los sistemas utilizados.

Las herramientas de simulación en desempeño energético deben tener flexibilidad en sus motores de cálculo para simular archivos climáticos generados por las diferentes instituciones a nivel mundial, de tal manera que posibiliten realizar simulaciones en cualquier localidad. Para el caso colombiano, realizar simulaciones con los archivos climáticos generados en las regiones del país. Así, se garantiza que en la simulación se obtengan los comportamientos de comodidad acorde al entorno geográfico en el que se realice la simulación. Deberán contener mínimo información hora a hora para un año completo de factores atmosféricos como: temperatura, humedad, radiación solar, velocidad del viento entre otros.

### **3.1.3 Ambiente interior**

El ambiente interior en los edificios en general está concebido en lo que se llama confort térmico para los ocupantes de estos, que de acuerdo a la norma ISO 7730, en la que se define el Confort Térmico como “aquella condición mental que expresa satisfacción con el ambiente térmico” (Hernández, 2007). Esta definición puede satisfacer a la mayoría de la gente, pero también es una definición que no es fácil de convertir en parámetros físicos.

Evaluar el confort térmico es una tarea compleja, ya que valorar sensaciones conlleva siempre una importante carga subjetiva; no obstante, existen unas variables modificables que influyen en los intercambios térmicos entre el individuo y el medio ambiente y que contribuyen a la sensación de confort, éstas son: la temperatura del aire, la temperatura de las paredes y objetos que nos rodean, la humedad del aire, la actividad física, la clase de vestido y la velocidad del aire (Hornero Pérez, 2013).

Dos condiciones deben ser cumplidas para mantener la comodidad térmica. La primera es que la combinación actual de temperatura de piel y temperaturas del núcleo del cuerpo proporcione una sensación térmica neutra. La segunda es el equilibrio del balance de energía del cuerpo: El calor producido por el metabolismo debería ser igual a la cantidad de calor disipada por el cuerpo. Los estudios de Fanger (en 1970 en su obra: “Thermal Comfort” de la Universidad de Copenhague) han demostrado que los valores de la temperatura de la piel y de la cantidad de

sudor secretado en las situaciones confortables dependen del nivel de actividad a través de relaciones lineales; la temperatura de la piel es linealmente decreciente con el consumo metabólico mientras la cantidad de sudor evaporado crece linealmente con la actividad, siempre en el supuesto de hallarnos en situaciones confortables.

Las variables que determinan el confort térmico se pueden resumir en tres relaciones básicas para que una persona se encuentre en situación de confort térmico (Hornero Pérez, 2013):

- Que se cumpla el equilibrio térmico.
- Que la tasa de sudoración esté dentro de los límites de confort.
- Que la temperatura media de piel esté dentro de los límites de confort

La introducción de estas relaciones en la ecuación de balance térmico, conduce a una expresión que Fanger llama la “Ecuación de Confort” donde se establece la relación que en situaciones de confort debe de cumplirse entre tres tipos de variables:

- Características del vestido: aislamiento y área total del mismo.
- Características del tipo de trabajo: carga térmica metabólica y velocidad del aire.
- Características del ambiente: temperatura seca, temperatura radiante media, presión parcial del vapor de agua en el aire y velocidad del aire.

Para resolver dicha ecuación se deben emplear métodos numéricos iterativos por tanto se vuelve muy compleja para realizarse manualmente (Hornero Pérez, 2013). Esta ecuación trae asociada además la envolvente del edificio (Característica arquitectónica, materiales que lo componen), sistemas HVAC, iluminación, etc. para mantener el equilibrio del confort térmico.

### **3.1.4 Costos asociados en el logro de eficiencia energética en edificios**

El incremento del uso de la energía en el mundo y el uso no racional de esta lleva asociado el incremento en el costo de la energía en los edificios y en todos los sectores de la industria. Las herramientas de simulación en desempeño energético, deben de tener la capacidad de cuantificar y discriminar los consumos de energía en todas sus formas, cantidad de emisiones al medio ambiente de CO<sub>2</sub> y demás contaminantes que un combustible pueda generar, posibilidades ahorro con mejoras en la eficiencia energética y todos los aspectos asociados a los costos que implique un proyecto de mejoras en edificios existentes y/o nuevos.

### 3.2 Aplicabilidad de las herramientas de evaluación de desempeño energético

Como se mencionó anteriormente es importante tener en cuenta cuan integral es la herramienta de evaluación, es decir, que aspectos se consideran para hacer los cálculos o estimaciones. Después de analizar diferentes herramientas de evaluación global del consumo de energía, se escogieron tres con base en las principales características que se describen a continuación. En la Tabla 5 se presenta una comparación entre el EnergyPlus y las herramientas basadas en el motor de cálculo DOE-2 (eQUEST, canQUEST y CALENER) con respecto a las variables más importantes en el proceso de simulación (Hong, 2009).

Tabla 5. Comparación entre EnergyPlus y herramientas basadas en DOE-2.  
Fuente: Autor

Variable	EnergyPlus	DOE-2
Cargas térmicas	Utiliza el método de balance de calor que es más preciso. Además, realiza el cálculo radiante y convectivo en cada superficie. Puede modelar el efecto de la masa térmica con más precisión. Modelado del intercambio con el terreno mejorado. El modelo aniso trópico proporciona cálculos de radiación solar y difusa correctos	Usa el modelo de función de transferencia de calor con factores de ponderación propios. Es menos preciso y más susceptible a error a través de la aplicación de factores de ponderación no adecuados. Los errores son mayores para elementos de la envolvente con masa térmica
Simulación integrada de cargas e instalaciones	La respuesta del edificio a cargas térmicas se calcula simultáneamente con la respuesta de la instalación. Esto incrementa el rango de condiciones que se pueden analizar, incluyendo aquellas donde las temperaturas del edificio no están siempre controladas, en oscilación libre. La retroalimentación de los sistemas de HVAC puede afectar a las cargas del edificio	La respuesta a cargas térmicas se calcula independientemente del funcionamiento de la instalación. Los cálculos de las cargas asumen que el edificio está en consigna. Limita la aplicabilidad de la simulación a espacios climatizados. La retroalimentación limitada del funcionamiento de las instalaciones afecta a las cargas del edificio y a las temperaturas interiores. Limita la simulación con precisión en instalaciones y la transferencia térmica en zonas

		insuficientemente calentadas o refrigeradas
Intercambio radiante	Modela explícitamente el intercambio radiante entre superficies. Los usuarios tienen control sobre la absorción solar y visible, así como la emisividad de cada superficie. La temperatura de la superficie interviene en la transferencia de calor. Comentar que el programa utiliza un cálculo simplificado en lugar de factores visuales explícitos que consideren el área y orientación de las superficies	Modela el intercambio radiante sólo a través de coeficientes combinados radiante-convectivos aplicados a cada superficie. El intercambio radiante y convectivo no varía con la temperatura en superficies opacas
Confort Térmico	Permite recoger las temperaturas de las superficies para evaluar el confort radiante. Incluye diversos modelos de confort térmico	No puede modelar directamente confort térmico dado que no recoge las temperaturas superficiales
Instalaciones de climatización	Las instalaciones se desarrollan a partir de componentes, constituyendo una forma más robusta y flexible de especificar las características de la instalación. Mediante un mecanismo de plantillas simplifica el proceso de modelado de las instalaciones, que de otra forma resulta más complejo	Las instalaciones están prediseñadas
Ventilación por desplazamiento	Puede modelar radiación y estratificación térmica mediante un modelo de estratificación de 3 nodos. Ambas capacidades son elementos críticos en el modelado de la ventilación por desplazamiento	Asume que el aire de las zonas está completamente mezclado con condiciones uniformes que no es adecuado para modelar la ventilación por desplazamiento
Sistemas de distribución de aire a través de piso falso	Puede modelar este tipo de sistemas en zonas interiores y perimetrales.	Asume aire completamente mezclado, no adecuado para estos sistemas

Sistemas radiantes de calor y frío	Puede modelar sistemas radiantes en calefacción y refrigeración	No incluye modelos de sistemas radiantes
Ventilación natural	Puede modelar ventilación natural que incluye cálculos multi zona considerando presión de viento, y gradientes térmicos, simultáneamente con la respuesta térmica del edificio y el efecto de la ventilación mecánica	Puede modelar ventilación natural de forma simplificada a través de ventanas practicables en unos pocos sistemas mono zona
Circuitos hidráulicos	Los sistemas de calor y frío pueden separarse en circuitos de distribución que pueden interconectarse. Esto proporciona un modelo mucho más preciso del consumo en bombeo. Permite por tanto evaluar sistemas de distribución alternativos como primario de caudal variable, primario/secundario y primario/secundario/terciario	Esta capacidad sólo está incluida en eQuest
Transporte de humedad	El modelo combinado de transporte de calor y masa permite modelar transporte de humedad y su efecto en las cargas de refrigeración. Despreciar este transporte puede originar errores en los intercambios sensibles y latentes	No puede modelar transporte de humedad
Paso de simulación múltiple	Las cargas térmicas se calculan en base a un determinado paso de simulación y a continuación se procede a la simulación de la instalación. Las cargas a las que la instalación no ha podido hacer frente se recogen en el cálculo de la temperatura y humedad para el siguiente paso de simulación. El paso de simulación por defecto es de 15 minutos pero puede reducirse hasta 1 minuto	Sólo puede calcular cargas en base horaria. No hay retroalimentación entre el cálculo de cargas y la simulación de las instalaciones

Uso de agua	Permite calcular el consumo de agua	No disponible
Energía renovable	Puede modelar sistemas fotovoltaicos independientes o integrados en el edificio	Sólo modela sistemas independientes
Luz natural y control	Tiene modelos detallados de iluminación natural	Tiende a sobreestimar los aportes de luz natural
Acrisolamiento y control de sombra	Dispone de más controles de sombra para ventanas y lucernarios	Disponibilidad limitada
Controles de adaptación a la demanda	Dispone de controles de adaptación a la demanda para iluminación, equipos y termostatos	No disponible
Iluminación exterior y su control	Puede modelar iluminación exterior y su control	No disponible
Cubierta vegetal	Puede modelar cubiertas vegetales	No disponible
Confort Visual	Calcula confort visual	No disponible

Respecto a la capacidad de utilizar archivos climáticos, los ficheros en Energy Plus, se obtienen de la propia web del programa en formato \*.epw (Estos ficheros son comunes en la gran mayoría de los países en el mundo, para el caso Colombiano aplica de igual manera) mientras que los ficheros usados tanto por los programas CALENER, LIDER y por los programas para procedimientos simplificado CE3 y CE3X en España son ficheros de formato \*.met los cuales se descargan desde la web del ministerio de industria, energía y turismo de España y se limitan a las 50 localidades principales de España tal como exige el documento suscrito por “Condiciones de aceptación de métodos alternativos”.

En la Tabla 6 se presenta una comparación entre EnergyPlus, eQUEST y TRNSYS, como herramientas representativas con capacidad de simulación para desempeño energético en edificios (Gonzalez, 2011).

Tabla 6. Comparación entre EnergyPlus, eQuest y TRNSYS. Fuente: Autor

Características Generales	EnergyPlus	eQUEST	TRNSYS
Cargas simultáneas, solución de planta y sistema	X	X	X
Exportación de geometrías de edificios a programas CAD	X		
Ilimitado número de superficies, zonas, sistemas y equipamiento	X	X	X
Temperaturas de espacios basadas en retro alimentación de sistemas de carga	X		X
Importación de geometrías de edificios desde programas CAD	X	X	X
Cargas zonas	EnergyPlus	eQUEST	TRNSYS
Cálculo de balance de calor	X	X	X
Temperatura radiante media	X		X
Factor de tiempo de respuesta (Funciones de transferencia)	X	X	X
Soluciones simultaneas de CFD (Computational Fluid Dynamics)	X		
Especificadas por el usuario	X	X	X
Entorno del edificio, iluminación natural y energía solar	EnergyPlus	eQUEST	TRNSYS
Muestra la reflexión de haz solar desde una ventana exterior e interior	X		X
Dispositivos de sombreado bidireccionales	X		X
Persianas de ventanas controlables	X	X	X
Ventana llena de un solo gas o mezcla de gases	X		X
Sombreado de cielo por obstrucciones	X	X	
Infiltración, ventilación, aire de cuartos y flujo de aire multi zona	EnergyPlus	eQUEST	TRNSYS
Sombreado de cielo por obstrucciones	X	X	X
Sistemas de energía eólica e hidrógeno			X
Energía fotovoltaica	X	X	X
Colectores térmicos solares	X		X
Colector solar no acristalado transcurrido	X		X
Sistemas y equipamiento eléctrico	EnergyPlus	eQUEST	TRNSYS
Carga eléctrica del edificio	X	X	X
Conexión de redes	X		X
Turbina de combustión	X	X	X
Micro generación integrada con simulación térmica	X	X	X

Sistemas de energía renovable	EnergyPlus	eQUEST	TRNSYS
Colectores térmicos solares	X		X
Placa plana acristalada			
Placa plana no acristalada			
Energía fotovoltaica	X	X	X
Sistemas eólicos e hidrógeno			X
Muro modificado (trombe wall)	X	X	X
Sistemas HVAC	EnergyPlus	eQUEST	TRNSYS
Componentes HVAC discretos	X		X
Sistemas HVAC configurables por el usuario	X	X	X
Flujo de circuito de aire, aire exterior, flujo de aire de zona	X		X
Circuitos caliente, frío y de agua condensada	X	X	X
Recalentamiento de volumen de aire variable / velocidad de ventilador variable	X		
Control de humedad	X		X
Emisiones ambientales	EnergyPlus	eQUEST	TRNSYS
Principales gases invernadero	X	X	
Equivalente en carbón de gases invernadero	X		X
Criterios de contaminación	X		
Contaminantes peligrosos	X		
Uso de agua en generación de energía	X		X
Disponibilidad de datos climáticos	EnergyPlus	eQUEST	TRNSYS
Datos climáticos provistos con el programa y por separado.	X	X	X
Estimación de radiación difusa de radiación global	X		X
Procesamiento y edición de datos climáticos	X	X	X
Formatos de datos climáticos leíbles directamente por el programa para cualquier formato especificado por el usuario.	X		X
Red de observación de superficie meteorológica y solar	X		
Evaluación económica	EnergyPlus	eQUEST	TRNSYS
Energía simple y demanda de cargas	X	X	X
Tarifas energéticas complejas	X	X	X
Variación calendarizada en todas las tazas de los componentes	X	X	X
Costos de ciclo de vida en Estimación de costos de componentes y equipamiento	X	X	
Costeado de ciclo de vida estándar		X	X

Para la selección de las tres herramientas de eficiencia energética se tuvo en cuenta las siguientes características:

- Nivel de aceptación y uso en el mundo.
- Trayectorias y evolución de diseño.
- Grupo de usuarios para el empleo de la herramienta, verificada y validada la utilidad.
- Tipo de licencia: Software gratis.

Estas características soportadas en: Uso de la energía, Ambiente global, Ambiente interior y Capacidad de dimensionar costos descritos anteriormente. Teniendo en cuenta que la herramienta CALENER es una herramienta de simulación la cual está soportada con el mismo motor de cálculo de eQUEST, se determina de acuerdo a los criterios descritos, realizar las simulaciones del edificio caso con las siguientes tres herramientas: CALENER, eQUEST/canQUEST y Energy Plus, para el caso Colombiano se tendrán en cuenta las adaptaciones en cuanto a condiciones climáticas, materiales usados en la construcción del edificio y horarios de ocupación, entre otros.

### **3.3 Procedimiento general**

Las herramientas de desempeño energético requieren de cierta información de la cual dependen los resultados del análisis, por lo tanto, es importante contar con la información al mayor nivel de detalle. A continuación, se describen los aspectos principales que se tuvieron en cuenta en este trabajo:

#### **3.3.1 Información general**

Se deben especificar datos tales como nombre del proyecto, tipo de edificio, área, región, ciudad (con estos datos, la herramienta identifica ubicación geográfica, archivos climáticos y todos los aspectos técnicos básicos del edificio). Además del tipo de energía que se emplea y al menos su consumo anual promedio.

#### **3.3.2 Geometría del edificio**

Aspecto constructivo en el que se define la forma del edificio, altura, número de plantas, tipo de ventanas número de zonas, fachadas exteriores, se caracteriza también los tipos de capas, tipos de materiales que componen las capas, composición del piso con el terreno, cubierta (techo) y tipo de división entre los diferentes espacios, tipos de acristalamientos, etc.

### **3.3.3 Definición de zonas**

En esta etapa, se describen las zonas climatizadas, el tipo de ventilación que se instala, se dimensiona de igual manera sus cargas térmicas de acuerdo a la definición geométrica, se puede caracterizar en forma independiente el tipo de sistema de climatización que se implemente, iluminación de acuerdo a las actividades y/o al área por metro cuadrado, indicación de cargas pico, se definen los sets de temperatura, etc. Para todos estos tipos de cargas, se deben definir los horarios de funcionamiento de acuerdo a la ocupación definida a los usuarios, todos estos aspectos determinan el nivel de comodidad humana y es uno de los aspectos importantes que determina la robustez de la herramienta de desempeño energético.

### **3.3.4 Horarios**

Característica importante y de mayor peso en el proceso de simulación ya que definen los perfiles de evolución a lo largo del tiempo de variables como la ocupación, infiltración, funcionamiento de ventiladores y equipos primarios, temperaturas de consigna, etc.

### **3.3.5 Sistemas primarios**

Se define sistemas tales como bombas hidráulicas, sistemas de enfriamiento, calderas (calefacción y ACS), enfriadores de agua, calefacción, etc. con todos los parámetros que estos sistemas requieren y especificaciones previamente definidas al inicio del proyecto.

### **3.3.6 Sistemas secundarios**

En estos sistemas se define la forma en que se distribuirá el aire acondicionado en las diferentes zonas, las fuentes de calor, horarios de funcionamiento de ventilación de impulsión, sistemas de retorno, se implementa con mayor o menor complejidad de acuerdo a la capacidad de cada herramienta, los niveles de control. Se especifica los tipos de circuito de distribución de agua caliente que alimenta las baterías de calor desde la caldera si es del caso de cualquier otra fuente de generación de calor.

### **3.3.7 Evaluación económica**

La evaluación económica depende de datos como el precio de la energía y los diferentes combustibles que se utilicen en los diferentes sistemas de la edificación. De igual forma, cuando la herramienta lo permita, se puede tener en cuenta la información relacionada con el costo de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

### 3.4 Descripción del caso de estudio

En este trabajo se plantea determinar y adaptar la herramienta más adecuada para la simulación de desempeño energético en edificios para el caso colombiano, mediante la comparación de consumos, niveles de eficiencia energética y la evaluación de estrategias de reducción de consumos. Para lograr estos objetivos, se realizarán los siguientes pasos que se sintetizan en el diagrama de la Figura 8:

- Analizar tres herramientas para evaluación de desempeño energético: CALENER GT, eQUEST y EnergyPlus.
- Realizar el modelado y simulación del edificio caso en las tres herramientas de desempeño energético seleccionadas.
- Realizar análisis de resultados.

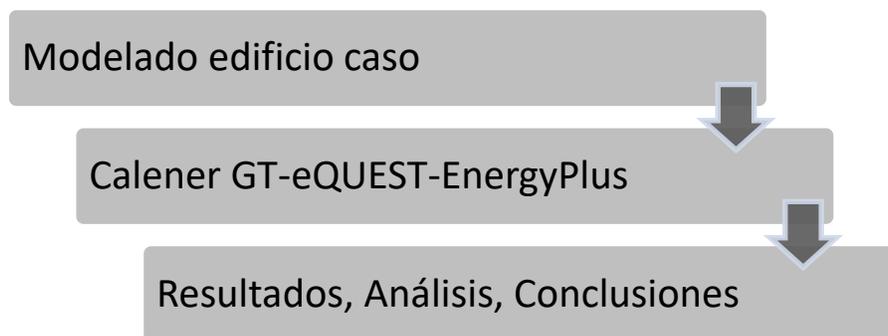


Figura 8. Esquema general de actividades. Fuente: Autor

#### 3.4.1 Edificio caso

El análisis de las tres herramientas de desempeño energético se efectuó en la fracción de un segundo piso de un edificio de oficinas de TIGO-UNE, con un área de 520 m<sup>2</sup>. Sin embargo, por cuestiones de simplificación, esta fracción se consideró como un edificio completo y a lo largo del documento se le denomina de esa forma. Este edificio está compuesto por cinco salas de reunión, un lobby y un espacio para 90 oficinas aproximadamente en el que laboran en horario de oficina de lunes a viernes y que se especifica más adelante. Tiene como característica especial un sistema dedicado de aire acondicionado tipo expansión directa, el cual es diferente al resto del edificio.

#### 3.4.2 Ubicación

El edificio se encuentra en la ciudad de Medellín (centro occidente), sector La América en la dirección Cra. 77 # 39B-16. Se pretende realizar la simulación con el archivo meteorológico de la zona cargado a la herramienta EnergyPlus y de allí

exportar, si es posible, a las otras dos herramientas seleccionadas eQUEST y Calener GT. En la Tabla 7 se resumen las características generales del edificio que se estudió en esta tesis.

Tabla 7. Características generales de edificio. Fuente: Autor

Característica	Información
Latitud, longitud, elevación	6,24733, -75,59702, 1500 msnm
Área total	519,8 m <sup>2</sup>
Área oficinas	449,3 m <sup>2</sup>
Área salas reuniones	70,5 m <sup>2</sup>
Año de construcción	1998
Salas de reunión	5
Planta	Segundo piso
Ubicación	Cra. 77 # 39B-16 (Sector América)

### 3.4.3 Geometría

La forma y distribución de la zona a evaluar se halla en una fracción del edificio, distribuidos de acuerdo con el plano presentado en la Figura 9. Las diferentes superficies que conforman la zona a evaluar del edificio son: cinco salas de reuniones, un lobby y una zona para 90 oficinas aproximadamente. Las superficies se harán coincidir en la simulación lo más aproximado a la realidad de acuerdo con la flexibilidad que permita cada herramienta.

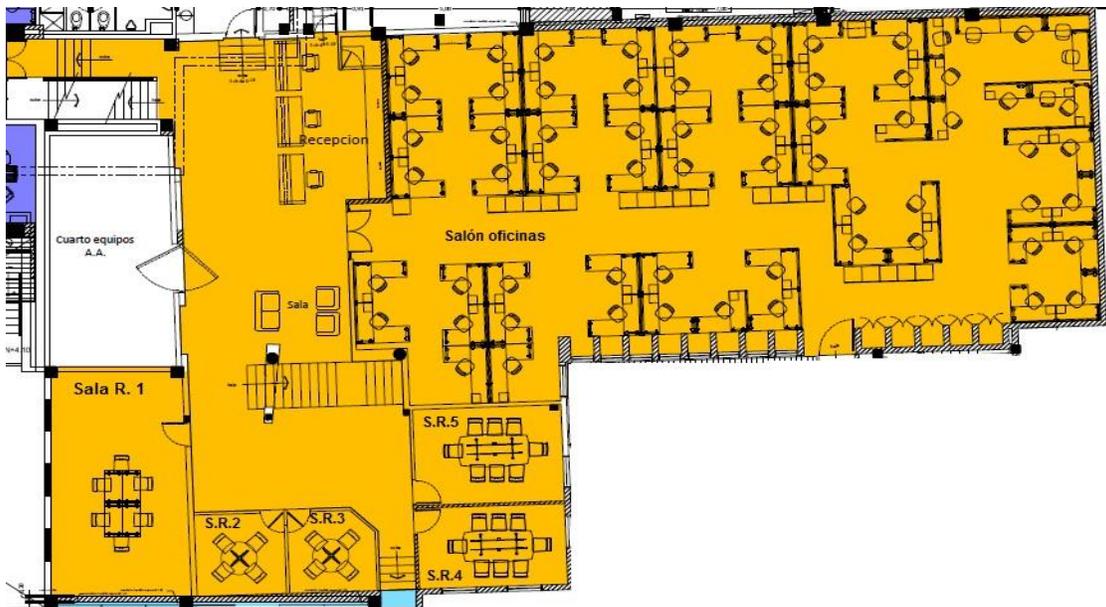


Figura 9. Plano geométrico del edificio. Fuente: Autor

### 3.4.4 Materiales

Los materiales que se emplearán en la simulación fueron los mismos que se identificaron mediante una inspección directa sobre la estructura del edificio. Las características de los materiales se tomaron de acuerdo a las características estándar correspondientes encontradas en la literatura. En las Tabla 8 a Tabla 10 se presentan las características de los materiales del edificio, el detalle del material del suelo y del encerramiento del edificio respectivamente.

Tabla 8. Información básica de la estructura del edificio. Fuente: Autor

Característica	Información
Altura	2,90 m
Techo	Cielo falso y lámina de zinc al exterior
Paredes	Ladrillo y revoque, 0,25 m
Piso	Loza de concreto (2 piso)
Vidrio ventanas	3 mm Cobrizado
Vidrio puertas	10 mm

Tabla 9. Propiedades de los materiales que componen las paredes del edificio.

Fuente: Autor

Descripción	Espesor (m)	Conductividad (w/mK)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Calor esp. (J/KgK)	Resistencia (m <sup>2</sup> K/W)
Hormigón concreto	0,33	1,4	2200	1050	0,014
Mortero cemento	0,02	1,4	2000	1050	0,014

Tabla 10. Propiedades de los materiales que componen el suelo del edificio. Fuente: Autor

Descripción	Espesor (m)	Conductividad (w/mK)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Calor esp. (J/KgK)	Resistencia (m <sup>2</sup> K/W)
Mortero Cemento	0,02	1,4	2000	1050	0,014
Ladrillo hueco	0.18	0,49	1200	920	0,224
Mortero cemento	0,02	1,4	2000	1050	0,014
Enlucido yeso	0,01	0,3	800	920	0,033

La cubierta tiene un cielo falso en fibra de vidrio a una altura de 2,90 m, un plenum de aislamiento térmico y una cubierta exterior en lámina de aluminio. En la Tabla 11 se presentan las características térmicas de la cubierta y en la Figura 10 se muestra una vista exterior del edificio a simular.

Tabla 11. Propiedades de los materiales que componen la cubierta del edificio.

Fuente: Autor

Descripción	Espesor (m)	Conductividad (w/mK)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Calor esp. (J/KgK)	Resistencia (m <sup>2</sup> K/W)
Metal Decking	0,0015	45,0060	418,4	7680	--
Fibra de vidrio	0,025	0,05	2550	--	--

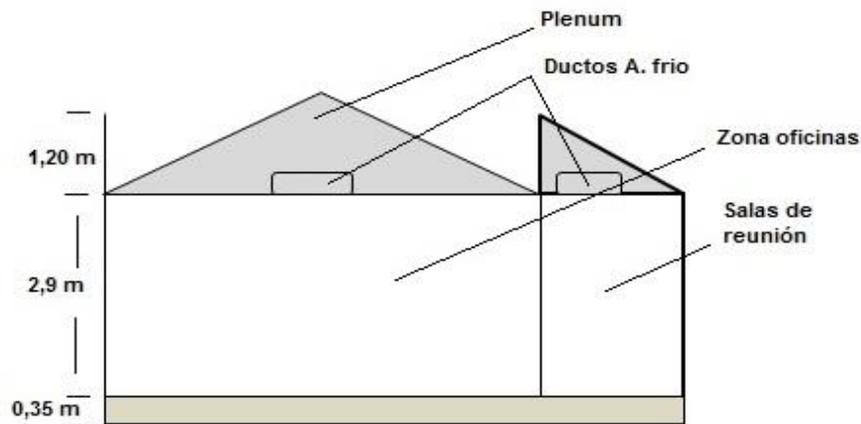


Figura 10. Vista exterior del área a simular. Fuente: Autor

Las particiones interiores referidas en el plano están hechas en “Drywall” de 10 cm de espesor (salas de reuniones 2, 3, 4 y 5), a excepción de la sala de reunión 1, en la que todos sus costados están en el mismo material del encerramiento general del edificio. Los puestos de oficinas son abiertos, cubículos independizados por vidrios de 1,20 m de altura.

La zona a simular cuenta con tres puertas de acceso: una de 2,15 m de ancho por 2,0 m de altura que comunica a otra sección del edificio, las otras dos son de 0,95 m de ancho por 2,40 m de altura (una de estas al lado oriente sale al exterior y la otra comunica a otra sección adyacente del edificio), todas en vidrio de 10 mm,

transparente. Para las ventanas y demás puertas se hace necesario clasificarlas de acuerdo a su ubicación.

- Zona de oficinas: se encuentran 9 ventanas de 0,8 m por 1,17 m, todas con profundidad del interior al exterior de 0,72 m (como elemento de sombra), con vidrio entero de 3 mm, persiana manual una puerta que separa “el lobby” de la zona de oficinas de 2,15 m por 2,40 m, con vidrio de 10 mm transparente.
- Sala de reuniones 1: puerta de acceso de 0,9 m por 2,1 m, vidrio de 10 mm, tres (3) ventanas de 1,18 m por 1,24 m en vidrio de 3 mm entero, todas con persianas manuales.
- Sala de reuniones 2: puerta de ingreso con dimensiones semejantes a la sala de reuniones 1 y a todas las demás salas, no tiene ventanas, tiene dos paredes en drywall de espesor 0,10 m.
- Sala de reuniones 3: puerta de ingreso con dimensiones semejantes a la sala de reuniones 1 y a todas las demás salas, no tiene ventanas, tiene tres paredes en drywall de espesor 0,10 m.
- Sala de reuniones 4: puerta de ingreso con dimensiones semejantes a la sala de reuniones 1 y a todas las demás salas, tiene tres ventanas al exterior de 1,24 m por 1,24 m, tiene dos paredes en drywall de espesor 0,10 m para independizar el interior y dos paredes en material hacia el exterior.
- Sala de reuniones 5: puerta de ingreso con dimensiones semejantes a la sala de reuniones 1 y a todas las demás salas, tiene una ventana al exterior, tiene tres paredes en drywall de espesor 0,10 m que separa el interior y una pared en material que separa el interior.

Se evaluaron en esta fracción del edificio tres características: envolvente, cargas térmicas (iluminación, equipos de oficina personas por m<sup>2</sup>, etc.) y sistema de aire acondicionado, sistemas ajustados a los horarios laborales. En la Figura 11 se ilustra edificio analizado en esta tesis.

### **3.4.5 Horario de funcionamiento**

Como se mencionó anteriormente, esta característica es sumamente importante para la evaluación del desempeño energético de un edificio. Mediante consultas con el personal de la empresa se estableció el horario de funcionamiento el cual se relaciona en la Tabla 12.



Figura 11. Edificio bajo estudio: a) Recepción, b) Salón oficinas, c) Exterior lado oriente, y d) Techo edificio. Fuente: Autor

Tabla 12. Horarios de funcionamiento. Fuente: Autor

Tipo	Horario
Horarios de ocupación	L-J: 7:30 - 18:00, V: 7:00 - 14:15
Horario equipo HVAC	L-J: 7:30 - 16:00, V: 7:00 - 13:00
Control Iluminación	Sensores de movimiento

### 3.4.6 Sistemas y características del HVAC

Estos sistemas están compuestos solo por un sistema de expansión directa marca YORK, de 20TR (Toneladas de Refrigeración) tanto su Unidad Manejadora de Aire (UMA) como su Unidad Condensadora de Aire (UCA), caudal fijo teórico de 350 cfm/TR.

### 3.5 Procedimiento de cálculo

Los procedimientos de simulación y cálculo predefinidos del edificio en las tres herramientas de simulación en desempeño energético determinan unos pasos a nivel general en unas secuencias lógicas de tal manera que se estructura el proyecto desde lo más magno (orientación y distribución geométrica) hasta los detalles más simples que determinan el comportamiento en demanda y consumos del edificio en energía, nivel de certificación (si aplica), así como también información estadística de emisiones de CO<sub>2</sub>, costos de consumos diarios, mensuales y anuales, además dependiendo de la robustez de la herramienta que realice la simulación se emplearán interfaces de apoyo para el modelado de la planta en 3D y modelado de sus respectivas cargas.

De acuerdo al tipo de herramienta, se tiene una estructura visual del proyecto con un “árbol” de objetos y sus elementos que componen la geometría del edificio, sus espacios, sub sistemas primarios y secundarios. Después de completar en detalle todos los datos de entrada en cada uno de sus objetos, la herramienta realiza un test con el fin de encontrar errores, para finalmente arrojar los resultados.

Es importante que la persona que realice el ejercicio tenga los conocimientos más generales de todos los sistemas que se ingresen a la herramienta (características eléctricas, implementación en sistemas de aire acondicionado, etc.), de esta manera se tendrá capacidad de analizar los resultados que genere cada herramienta. A continuación, se describe los procedimientos a nivel general que tiene cada una de las herramientas de desempeño energético en las que se modeló el edificio bajo estudio.

#### 3.5.1 CALENER GT

Se recopila la información necesaria del edificio que se quiere modelar: número de plantas, cantidad de espacios, orientaciones básicas, definición de zonas térmicas, etc. Como se mencionó anteriormente, en cuanto al sistema de climatización, se debe definir si existe un sistema centralizado en equipos HVAC, alternativas en energías renovables, sistemas de aguas calientes sanitarias (ACS), en general se debe tener claridad de todos los detalles constructivos, electromecánicos, energéticos, etc. Estos datos incluyen características constructivas como fachadas, muros y su composición y espesor (por capas), en la cubierta, muros laterales y componentes con el terreno. En la pantalla principal se presenta el dialogo de inicio y se gestiona la mayor parte del programa, el aspecto de dicha pantalla antes de llevar a cabo alguna operación se muestra en la Figura 12.

Cada uno de los objetos se introduce en sus respectivos campos con todas las propiedades correspondientes: caudales, altura, potencia, tipos de control, horarios asociados y demás parámetros que sean requeridos de acuerdo al objeto que se esté implementando.

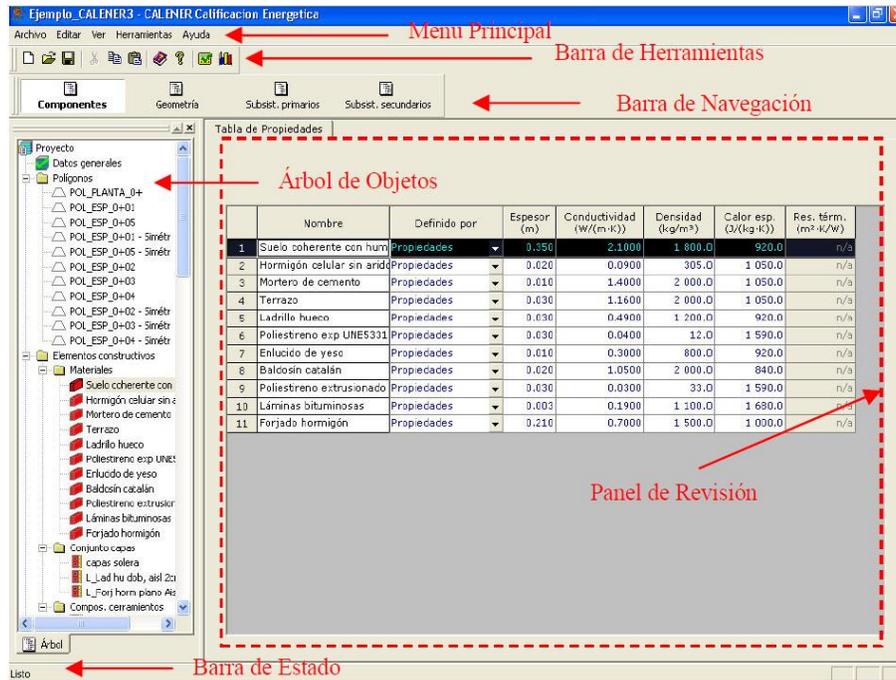


Figura 12. Pantalla principal herramienta simulación CALENER. Fuente: (IDAE, 2009)

- Inicio del Proyecto: En las opciones de inicio del programa se pregunta la opción de abrir proyecto existente o nuevo proyecto. Con la elección de nuevo proyecto, en este campo se introduce el nombre del este, dirección, autor entre otros, el tipo de edificio, localidad, siendo estos dos de los datos más importantes que deben de introducir (opción para los valores por defecto de acuerdo al tipo de edificio que se escoja para los espacios que se desarrollan más adelante).
- Definición de espacios: Previamente se definen una serie de componentes como polígonos, composiciones de cerramiento, horarios, etc. que posteriormente serán usados por otros objetos en los otros tres arboles: geometría, subsistemas primarios y subsistemas secundarios. Ya definidos estos aspectos, se caracterizan y definen la composición de los espacios (esta composición permite tomar compuestos de materiales desde su librería y/o crearlos teniendo las características térmicas básicas de estos), ocupación por

persona, calor sensible, calor latente, uso de energía debido a equipos, iluminación y renovación/hora en infiltración. Así mismo, se introducen en los objetos de esta parte las características térmicas de cada componente que conforma cada espacio (IDAE 2009).

- Definición de horarios: Los objetos horarios son importantes en CALENER-GT, ya que definen los perfiles de variación a lo largo del tiempo de muchas variables, como son la ocupación, infiltración, funcionamiento de ventiladores, temperaturas de consigna, etc. se cargan por defecto ciertos horarios que son de acuerdo al tipo de edificio que se haya seleccionado al comienzo del proyecto, los cuales son modificables por el usuario si es necesario. Estos horarios se clasifican por ocupación, fuentes internas, infiltraciones, iluminación de uso diario, semanal y anual teniendo en cuenta en detalle periodos de vacaciones, festivos y actividad nocturna si es del caso.
- Creación de planta (Geometría): Se definen número de plantas, vértices, altura, si hay “cielo falso”, “piso falso”, etc. Se especifica la geometría de los espacios, con su respectiva ubicación cardinal (norte, sur, este y oeste). Como en este punto del proyecto ya se tiene la creación de horarios, se define el horario para cada uno de estos espacios y se caracterizan elementos de sombra. El paso a seguir, es determinar ventanas con el tipo de acristalamientos (se puede tomar sus características desde su librería y/o crearlo teniendo las características básicas del tipo de acristalamiento) (IDAE, 2009).

En este punto se tiene la estructura lista para la implementación de los subsistemas primarios y secundarios, a seguir:

- Árbol de subsistemas primarios, se crean los sistemas relacionados con equipos de producción primaria: bombas y sus respectivos circuitos hidráulicos, planta enfriadora, calderas, etc. (es decir, todos los componentes que incluyen circuitos de agua fría, caliente, circuitos de condensación, unidades de tratamiento de aire) especificado de acuerdo a la información recopilada previamente al inicio del proyecto. Todos estos objetos aparecen en diferentes carpetas asociadas al árbol de subsistemas primarios pertenecientes al proyecto en los que se va creando cada uno de estos (IDAE, 2009).

- **Árbol subsistemas secundarios:** Incluyen objetos relacionados con la distribución de aire (enfriamiento, calefacción y sus tipos de caudal), distribución de agua fría, caliente.

En cada uno de estos objetos, se especifican potencias de ventilación, de baterías de frío, calefacción y todas las propiedades relacionadas con cada uno de estos objetos (IDAE, 2009). Una vez definidos los subsistemas primarios y secundarios, se caracterizan cada una de las zonas creadas anteriormente y se relacionan con los espacios.

- **Análisis de resultados:** Ya definido completamente el edificio y antes de ejecutar la herramienta de resultados se califica el edificio (calificación representada desde la letra A hasta G, siendo A la mejor calificación y G la calificación más baja). El objetivo principal de la Herramienta de Resultados es como ya se comentó, facilitar al usuario, tras la simulación con el programa CALENER-GT, el análisis del edificio desde el punto de vista de las emisiones de CO<sub>2</sub>, con el objeto de identificar las posibles mejoras que redujesen tales emisiones y aumentar la calificación arrojada por la herramienta. Los resultados se presentan en un conjunto de tablas y gráficos, que permiten identificar cuáles son los factores más influyentes en dichas emisiones.

Las emisiones dependen tanto de la demanda energética como del comportamiento térmico del edificio, además de las características ocupacionales, operacionales y funcionales del mismo y del rendimiento de los equipos que satisfacen dichas demandas. En los resultados, se tiene la opción de desglosar las emisiones de CO<sub>2</sub> por tipo de energía mediante gráficos de barras para cada mes del año. En la Figura 13 se ilustra un ejemplo de calificación energética (IDAE, 2009).

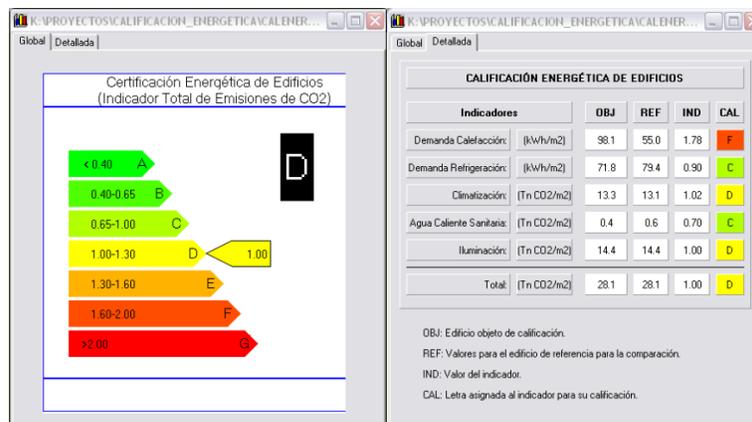


Figura 13. Ejemplo de calificación de un edificio. Fuente: Autor

### 3.5.2 eQUEST/CAN-QUEST

Al inicio se presenta el dialogo con las opciones para seleccionar “Proyecto reciente”, “Proyecto existente” “Nuevo proyecto” vía “Wizard” o “Generar archivo de tiempo skycalc”, como se muestra en la Figura 14.

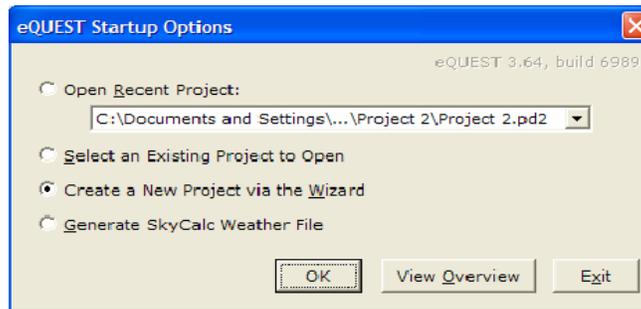


Figura 14. Diálogo para inicio de proyecto energético con eQUEST. Fuente: Autor

A continuación, se describen las cuatro opciones:

- Open a recent project: abre una lista de proyectos en la máquina local, listado en orden cronológico inverso (el más reciente, es el primero). Esta lista es conservada a través de las actualizaciones y reinstalaciones del programa.
- Open an existing Project: Seleccionando esta opción, habilita al usuario para buscar en red local un archivo existente, con las posibilidades de salvarlo en la máquina local.
- Create a new project via the Wizard: esta es la opción por defecto y es la principal ventaja de esta herramienta sobre otras. Usando esta opción se crea desde cero el proyecto, más adelante se ilustra el uso de “Schematic Design Wizard (SDW).
- Generate a Skycalc Weather file: Es una hoja de cálculo disponible desde el sitio web de Energy Design Resources.

Elijiendo la opción “Create a new project via the wizard”, se presenta el dialogo que se muestra en la Figura 15 el cual permite el inicio para caracterizar de acuerdo al alcance del proyecto a analizar:



Figura 15. Diálogo Schematic Design Wizard (SDW) y Design Development Wizard (DDW). Fuente: Autor

- Schematic Design Wizard: Esta opción se presenta para proyectos de estructuras más pequeñas y de información limitada, horarios simples e igualmente cargas internas y horarios de evaluaciones para un sistema HVAC de poco tamaño (hasta dos sistemas HVAC).
- Design Development Wizard: Esta opción es para usos más avanzados, información más detallada disponible y simulación para estructuras más grandes y complejas.

Para la opción Schematic Design Wizard se tienen varios pasos en los que se describen los aspectos que definen el proyecto a simular (envolvente, iluminación, sistemas HVAC, energías renovables, etc.), en la Figura 16 se presenta el primer diálogo de las secuencias en las que se explica paso a paso todos los requerimientos para realizar la simulación del proyecto.

- Project Name: Se introduce el nombre del proyecto, el cual da el nombre de la carpeta donde se almacena el proyecto.
- Building Type: Es la clase de edificio que se quiere analizar.
- Weather file Location Set: Hay 4 opciones, comprende caracterizar las cuatro opciones de localización, región, ciudad y jurisdicción.
- Utility: Se especifica el tipo de fuente de energía eléctrica y gas con las capacidades que se requieren simular.
- Area and Floors: Se especifica el área a simular, número de pisos y posibilidad de sótanos.
- Cooling and Heating: Se especifica los sistemas HVAC (para sistemas de aire acondicionado, y calefacción, etc.)

- Other Data: Especifica el año de análisis, luces artificiales con o sin control y otros detalles de uso.

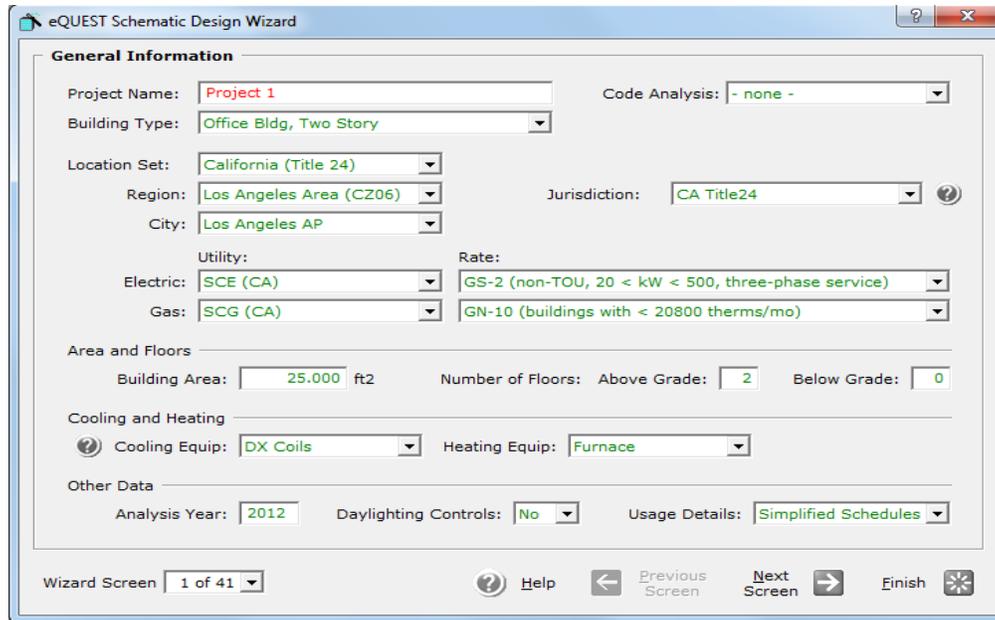


Figura 16. Diálogo Schematic Design Wizard en el inicio del uso de la herramienta.

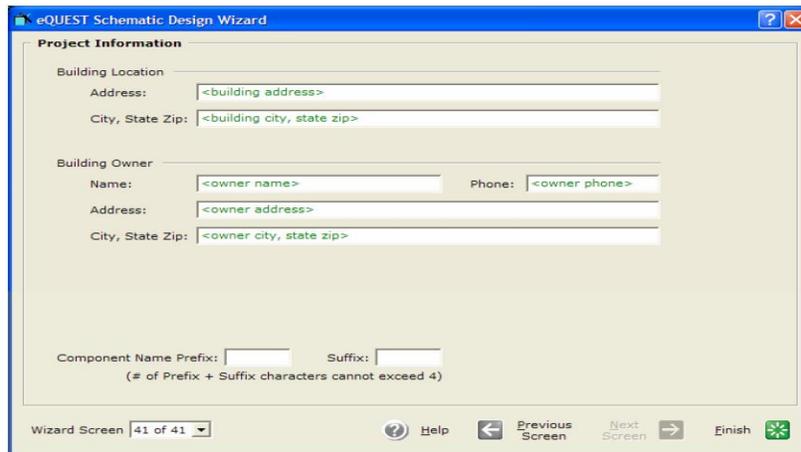
Fuente: Autor

Cada vez que se llena un dialogo completo, automáticamente se presenta otro nuevo diálogo desde el paso 1 hasta el 41, identificados en la esquina inferior izquierda.

A partir de este punto de simulación, se sigue paso a paso cada campo en el que se caracterizan en un orden predefinido geometría y áreas (en este punto se da la opción de importar desde un archivo CAD la geometría de un proyecto determinado), puertas y ventanas interiores y exteriores, elementos de sombras, pasando por todas las características de cargas térmicas, sistemas de aire acondicionado y sistemas HVAC en general (subsistemas primarios y secundarios), horarios, etc.

Además, permite la implementación de control en todos los sistemas de ventilación, calentamiento, sistemas de agua caliente sanitaria (ACS), distribución en cargas de la red eléctrica. En el paso 40 se caracterizan los consumos y su costo en combustibles si aplica en el proyecto (está condicionado si en paso 1 fue seleccionado consumo de gas como "Custom").

En la Figura 17 se lustra el último paso (41 de 41) con el que finalmente se ensambla el proyecto. Para dejar el Schematic Design Wizard y proceder al interfase detallado, se finaliza el proceso. Luego la herramienta genera un archivo “DOE-2” (\*.INP), este es un archivo de texto de entrada, el cual contiene DOE-2’s BDL (Building Description Language). En el campo “Component Name Prefix y Suffix” del último screen del SDW, (y el primero de DDW), evita redundancia en nombres de los componentes, al momento de ensamblar el proyecto con otros proyectos ya simulados en la herramienta (Para el caso de multi proyectos).



The screenshot shows the 'eQUEST Schematic Design Wizard' window at the final step, 'Project Information'. The window has a blue title bar and a light beige background. It contains several input fields for project details:

- Building Location:** Fields for 'Address' and 'City, State Zip' with placeholder text '<building address>' and '<building city, state zip>' respectively.
- Building Owner:** Fields for 'Name', 'Address', and 'City, State Zip' with placeholder text '<owner name>', '<owner address>', and '<owner city, state zip>' respectively. A 'Phone' field with placeholder '<owner phone>' is also present.
- Component Name Prefix and Suffix:** Two small text input fields. Below them is a note: '(# of Prefix + Suffix characters cannot exceed 4)'. The 'Prefix' field is currently empty, and the 'Suffix' field contains a single character.

At the bottom of the window, there is a 'Wizard Screen' dropdown menu showing '41 of 41'. To the right are buttons for 'Help', 'Previous Screen', 'Next Screen', and 'Finish'.

Figura 17. Último diálogo antes de ensamblar el proyecto. Fuente Autor

Posterior a la creación del edificio y la inclusión de sus características, se procede a verificar posibles errores del modelo y a realizar la simulación. Luego de simulado el proyecto, la herramienta presenta un resumen detallado de los consumos mensuales de uso final, ahorros de energía, consumos picos, etc. Los resultados se presentan en forma de gráficos y tablas. La Figura 18 muestra un ejemplo de reporte gráfico de los resultados de consumo de uso final de energía.

La herramienta CAN-QUEST es una herramienta basada completamente eQUEST, acondicionada solo para las localidades canadienses y con las unidades de medida convertidas al sistema internacional. Por tanto, tiene exactamente los mismos pasos de principio a fin que la herramienta de simulación eQUEST.

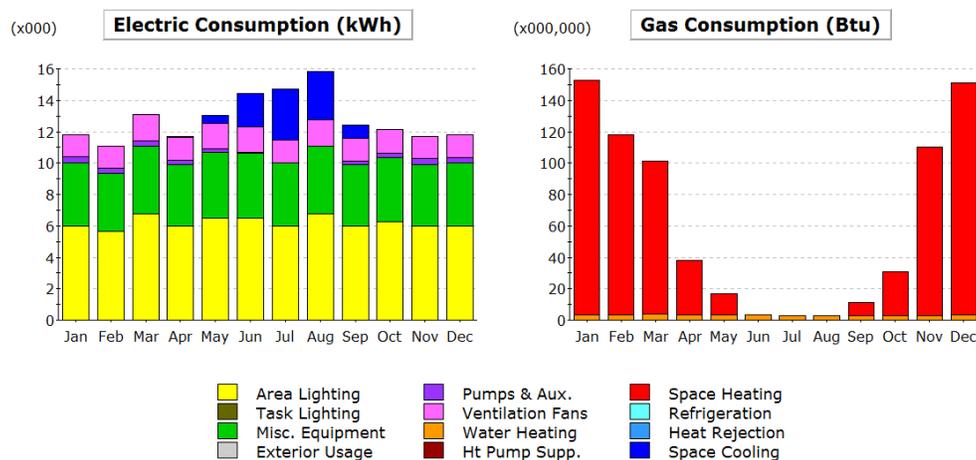


Figura 18. Ejemplo gráfico de consumo de uso final de energía. Fuente: Autor

### 3.5.3 EnergyPlus

EnergyPlus como tal no tiene una interfaz de usuario, su objetivo es ser el motor de simulación en torno a una interfaz secundaria, sus entradas y salidas son simple texto claramente descrito. Los diseñadores de interfaz gráfica han creado herramientas para poder interactuar con EnergyPlus según las necesidades del mercado y las demandas.

En este trabajo se realizó simulación con dos interfaces: SketchUp y OpenStudio, por tanto, a continuación, se describirá el procedimiento de simulación con la herramienta EnergyPlus como herramienta de simulación en estado básico y con el modelado utilizando las interfaces mencionadas anteriormente. Instaladas las dos herramientas informáticas, el proyecto se inicia abriendo la aplicación SketchUp, en el cual se desarrolla el proyecto a nivel arquitectónico junto con las herramientas de caracterización OpenStudio. La Figura 19 muestra el entorno principal del SketchUp, mientras que la

Figura 20 muestra la aplicación OpenStudio.

Después de definir la envoltura del edificio se emplea la herramienta "Surface Matching" para definir las condiciones de límites, esto con el fin de permitir las conexiones térmicas entre los espacios e informar a OpenStudio acerca de las condiciones para simular en la aplicación.

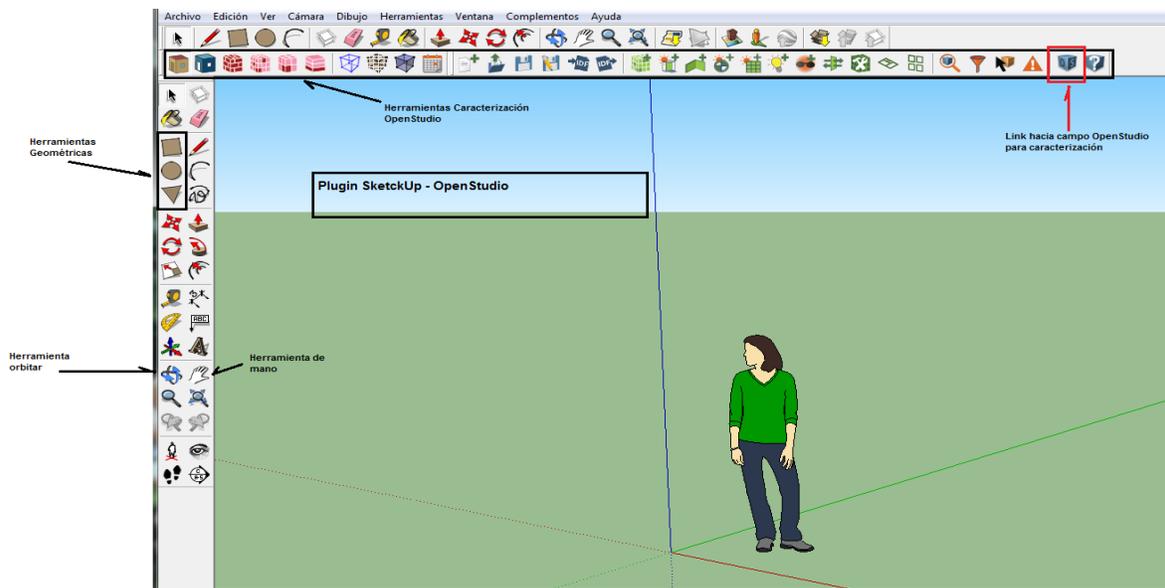


Figura 19. Entorno principal SketchUp. Fuente: Autor

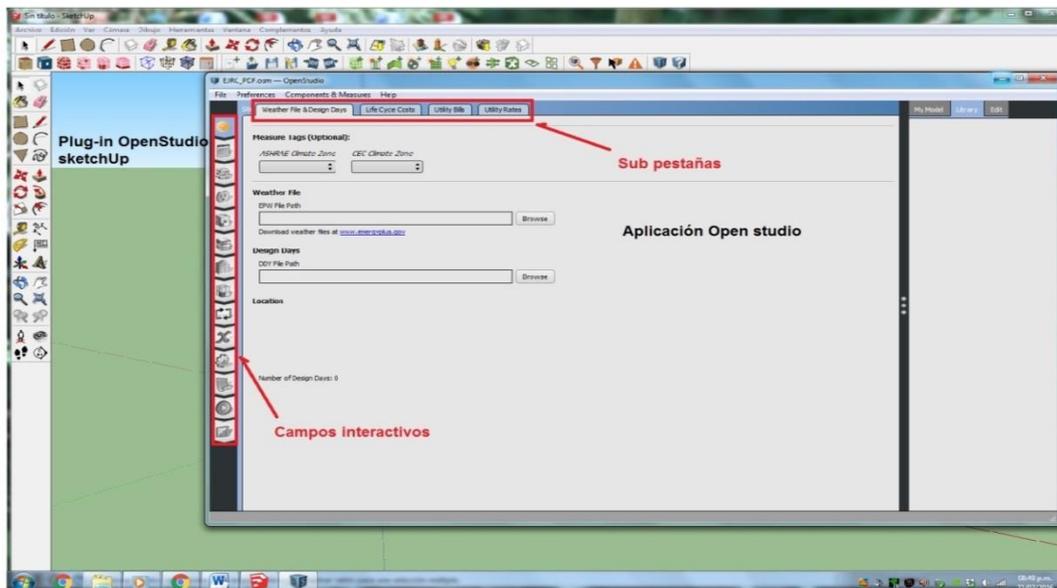


Figura 20. Aplicación OpenStudio. Fuente: Autor

Mediante los diferentes modos de interpretación o renderizado se caracterizan las condiciones de límites, construcción, tipos de espacio, zonas térmicas y números de pisos, luego de caracterizar el modelo completamente desde la herramienta de SketchUp configurando elementos de sombra, tipos de espacios, etc. se pulsa en el botón de Open Studio, para iniciar su modelo en la aplicación de Open Studio.

Una vez definido el proyecto y caracterizado con las diferentes zonas, se lleva hacia la aplicación OpenStudio, mediante el botón OpenStudio de la barra de herramientas. Una vez en la herramienta, el flujo de trabajo básico para iniciar OpenStudio en el Plug-in de SketchUp, es crear el edificio y asignar las características de los espacios, luego el modelo es cargado en la aplicación de OpenStudio y se puede explorar a través de las pestañas.

Para iniciar la aplicación de OpenStudio desde el Plug-in SketchUp, el modelo se abre automáticamente en OpenStudio, pero para salvar el archivo o abrir uno nuevo, se selecciona desde el menú de Open Studio directamente. Cuando se salva el archivo con la extensión .osm, una carpeta es creada como un folder osm que contiene información como archivos de clima, medidas, resultados de simulación, etc. cargar también la librería desde la pestaña "File", es una característica muy importante, ya que permite ya que permite cargar las librerías con los componentes del tipo de edificio específico.

Las unidades de medida se pueden caracterizar por la pestaña "Preferences", esto afecta los campos de entrada mas no los resultados. A continuación, se describen los campos interactivos del OpenStudio:

- Site: se define el sitio geográfico del modelo, características climáticas (editables), año en que se simula el modelo, si se activa o no el horario de verano, etc.
- Schedule: se definen los horarios de uso del edificio, los componentes y características de los materiales de construcción, cargas térmicas en general y los tipos de espacios.
- Facility: se caracteriza la instalación en general, de acuerdo al número de pisos, etc.
- Space: se visualizan los espacios caracterizados desde SकेctUps para su edición si es del caso.
- Termal Zones: de igual manera, se caracterizan las zonas térmicas del modelo.
- HVAC Systems: se introduce el tipo de sistema HVAC en el modelo con todas las características que requiera como potencias, horarios, etc.
- Output Variables: se habilita o no el tipo de variables que se deseen valorar y analizar en los resultados: rata de almacenaje de energía, balance de cargas térmicas, humedad relativa, etc.

- Simulation Settings: se define inicio de periodo en simular, control, factor de dimensionamiento en calentamiento y enfriamiento, algoritmos de balance de calor, etc.)
- Scripts/Measures: hay tres tipos de medida Open Studio Measures, el cual ejecuta el modelo osm antes de ser convertido el modelo a extensión IDF, EnergyPlus Measure que puede ser iniciado en el archivo IDF antes de ser migrado a EnergyPlus y Reporting Measures el cual produce informes para realizar un monitoreo de los resultados.
- Run Simulation: en esta pestaña es donde se inicia la simulación, después de finalizar al 100% permite acceso a ver resultados
- Results Summary: en esta pestaña se presenta el resumen de resultados.

### 3.6 Medidas evaluadas en el edificio caso

Las medidas a evaluar en el edificio caso se enfocarán en cuatro aspectos principalmente: envolvente del edificio, cargas térmicas, sistema de aire acondicionado y horario de uso de los equipos eléctricos internos.

La fachada existente se conservó en la simulación lo más real posible de acuerdo a cada herramienta, teniendo en cuenta que no sería posible alterar su estructura física o su envolvente. En iluminación, el procedimiento a realizar para determinar el promedio en demanda consiste en contabilizar las luminarias, promediar el total de potencia instalada y determinar la potencia por unidad de área, estos resultados se compararán con el mínimo exigido de acuerdo a la norma RETILAP. De la misma forma se tendrá en cuenta la cantidad de equipos de cómputo, impresoras y demás equipos de oficina, así como la cantidad de funcionarios por m<sup>2</sup>.

Con respecto a los sistemas HVAC se consideró su capacidad instalada, caudal de aire, consumo medido, análisis de filtraciones, además de realizar la simulación con un sistema de aire con caudal variable para evaluar puntos de mejora. De acuerdo al aforo realizado en la zona a evaluar, tanto del sistema de iluminación, cargas eléctricas (computadores, impresoras y elementos varios), se define la demanda de energía. Teniendo en cuenta el área de los diferentes recintos, se promedia el área por persona y demás información requerida para la realización de las respectivas simulaciones en las tres herramientas de desempeño energético. En la Tabla 13 se presenta la información recopilada, en donde Sala R1 se refiere a la sala de reuniones 1, Sala R2 se refiere a la sala de reuniones 2 y así sucesivamente. En la Tabla 14 se presentan los datos nominales del sistema de aire acondicionado.

Tabla 13. Información base del edificio caso. Fuente: Autor

Espacio	Ocupación (m <sup>2</sup> /persona)	Sensible	Latente	Equipos (W/m <sup>2</sup> )	Iluminación (W/m <sup>2</sup> )
		ocupante (W/persona) 24°C	ocupante (W/persona) 24°C		
Sala R1	1,5	80	80	10	19,7
Sala R2	1,6	80	80	24	14,4
Sala R3	1,6	80	80	24	14,4
Sala R4	1,6	80	80	57	18,5
Sala R5	1,6	80	80	57	18,5
Oficinas	5,5	80	80	7	7,5

Tabla 14. Características sistema de aire acondicionado. Fuente: Autor

Planta de Aire acondicionado (Con compresor alternativo)	
Potencia nominal kW	28
Coeficiente de rendimiento (COP)	2,5
Amperaje de carga nominal (RLA)	42
Tonelada de refrigeración (TR)	20
Ventiladores	
Potencia nominal kW	3,73
Caudal teórico (m <sup>3</sup> /h)	595
Caudal neto (m <sup>3</sup> /h)	11893
Caudal ventilador (m <sup>3</sup> /h/persona)	45

### 3.7 Consideraciones adicionales

Para proponer acciones que lleven a una mejoría en la eficiencia energética es importante tener en cuenta algunos aspectos que influyen en el consumo de energía en edificios de oficinas como el caso de estudio de este trabajo. Por tal motivo, a continuación, se discuten algunos de estos aspectos.

#### 3.7.1 Comportamiento del personal

Cambiando muchos de los hábitos se puede utilizar la energía de una forma más eficiente. Una de las tareas más importantes de cualquier estrategia de gestión energética es informar y educar a las personas con el objetivo de cambiar sus hábitos y evitar derroches de energía innecesarios. De igual forma, el número de

personas y de horas que en un edificio está ocupado es un factor determinante en la demanda energética.

### **3.7.2 Edificio**

Es importante lograr un aprovechamiento al máximo de la luz natural. De igual forma el estado del edificio, es decir, lo relacionado al grado de aislamiento térmico, estado de puertas, ventanas, persianas, protección de la insolación, etc. También juega un papel fundamental en el gasto energético. La existencia de controles y regulación de las instalaciones energéticas del edificio aporta en gran medida mientras sean accesibles al personal para que se programe un uso efectivo de dichos recursos.

Por otro lado, una distribución más eficiente del espacio de trabajo que aproveche la ventilación natural, puede reducir notablemente el consumo de energía en climatización.

### **3.7.3 Sistemas de aire acondicionado**

La presencia de sistemas de aire acondicionado en los edificios de oficinas es un hecho cada vez más frecuente y al mismo tiempo preocupante (hay regiones en Colombia donde estos sistemas no se hacen necesarios), dado que muchas de estas instalaciones presentan unos consumos de energía generalmente excesivos propiciados por varios factores:

- La realización de edificios con tendencias estéticas contrarias a la racionalización energética.
- La concepción de edificios de imagen corporativa en los que el derroche forma parte de la imagen.
- La exigencia por parte de los trabajadores de unas condiciones térmicas superiores a los estándares normales de confort, ligado en muchas ocasiones a la identificación subjetiva de derroche con los conceptos de estatus y calidad de vida.

### **3.7.4 Sistema de iluminación**

La iluminación supone uno de los principales puntos de consumo energético de un edificio de oficinas, por lo que cualquier actuación dirigida a reducir este consumo tendrá una repercusión substancial en el consumo energético global. Hay que contar además con que los sistemas de iluminación también inciden sobre el consumo global de energía de la oficina a través de la energía disipada por las lámparas en forma de calor, lo cual contribuye a aumentar las temperaturas interiores. Entre los

factores que influyen en el consumo de energía en los sistemas de iluminación se encuentran los siguientes (UPME, 2007):

- Eficiencia energética de luminarias en general y equipos auxiliares.
- Uso de la instalación (régimen de utilización, implementación de sistemas de regulación y control y aprovechamiento de la luz natural entre otros).
- Mantenimiento del sistema de iluminación.

Las instalaciones de sistemas de control en iluminación permiten conseguir una gestión más eficiente del sistema de iluminación y obtener importantes ahorros de energía. También es importante que a la hora de elegir las luminarias se escojan modelos con altos rendimientos para conseguir una distribución apropiada de luz.

### **3.7.5 Equipos eléctricos**

Hoy en día, en todas las organizaciones existen un gran número de ordenadores y de otro tipo de equipos ofimáticos como impresoras, fotocopiadoras, escáneres, faxes, plotters, etc. 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 de la organización. Los equipos de oficina pueden ser responsables de más del 20% del gasto eléctrico en algunos edificios de oficinas (llegando en algunos casos hasta el 70%), y de ellos tan sólo los ordenadores personales representan cifras en torno al 56% (WWF, 2008). A estos equipos hay que sumarles, además, los consumos debidos a otros electrodomésticos también habituales en una oficina, como neveras, microondas, televisores, cafeteras.

También se debe tener en cuenta que estos equipos generan calor con su uso, aumentando la carga térmica en el interior de las instalaciones e influyendo indirectamente en la demanda de energía del aire acondicionado de la oficina. Reducir el consumo de estos equipos puede proporcionar, por lo tanto, beneficios importantes tanto ambientales como económicos para la organización. Entre las medidas para reducir los consumos de estos equipos es despertar conciencia entre los usuarios para el uso racional de esta y realizar una gestión eficiente de la energía: configurando los modos de ahorro de energía de los equipos y evitando las pérdidas en stand-by para evitar consumos innecesarios fuera del horario laboral de la oficina.

Al acabar la jornada laboral, muchos computadores, monitores, impresoras siguen consumiendo energía, aunque nadie los use al permanecer en estado stand-by, e

incluso, en algunos casos, aunque estén apagados del todo, por el simple hecho de permanecer conectados a la red. Algunos dispositivos ópticos, como teclados o ratones, siguen también encendidos, aunque se haya apagado el ordenador. Se recomienda configurar adecuadamente el modo de ahorro de energía de los ordenadores, impresoras, fotocopadoras y resto de equipos ofimáticos, con lo que se puede ahorrar hasta un 50% del consumo de energía del equipo (WWF, 2008).

## 4. Resultados y discusión

La necesidad de mejorar el desempeño energético en los edificios, requiere los medios para realizar un análisis tanto en la etapa previa de diseño como en la de implementación en los sistemas energéticos de los edificios (WWF, 2008). Las herramientas para modelamiento energético frecuentemente usan datos de entrada simplistas e ideales que no son representativos para la ocupación y sistemas reales de los edificios. Como resultado, se tienen grandes discrepancias entre el rendimiento predicho y el rendimiento real, típicamente sobrepasando el 30% y en algunos casos con diferencias de hasta el 100%. Estas discrepancias son debidas en parte a razones técnicas, así como a suposiciones imprecisas de clima y diseño. Otra razón importante está relacionada con la ocupación y como las herramientas de modelamiento actual de energía no tienen en cuenta las acciones de los ocupantes y sus características de consumo de energía durante la simulación. De hecho, algunos estudios muestran la importancia que juegan los ocupantes en determinados consumos de energía en los edificios y enfatiza en la necesidad de involucrar y socializar desde la etapa de diseño a estos para mejorar las predicciones en los consumos de energía (Azar & Menassa, 2012).

A la fecha se han desarrollado más de 380 herramientas (Attia, Hensen, Beltrán, & De Herde, 2012) para múltiples enfoques: residencial, hospitalario, aeroportuario, bodegaje, comerciales, servicios de oficinas, etc. con capacidad de ayudar a analizar problemas de tipo térmico (ventilación, HVAC), iluminación, coeficientes de transferencia de calor en la gran mayoría de los materiales que componen la estructura o envolvente del edificio (ventanales, puertas, techos, concretos, adobes, triturados, etc.), equivalencias en CO<sub>2</sub> emitidos a la atmosfera, análisis de costos en consumos de energía, carga ocupacional, etc. Además con capacidad de implementar simulación con sistemas de fuentes energéticas alternativas propias del sitio del proyecto (Rallapalli, 2010). A continuación, se presentan los resultados de las simulaciones del caso estudio con las herramientas descritas en el capítulo anterior.

#### 4.1 Resultados de simulación caso de estudio

Como se describió en el capítulo anterior, el caso de estudio correspondió a un edificio de oficinas, del cual se tomó una fracción del segundo piso, con un área de 520 m<sup>2</sup>. Este sector del edificio tiene como característica especial un sistema dedicado de aire acondicionado tipo expansión directa, diferente al resto del edificio. Igualmente, está compuesto por cinco salas de reunión, un lobby y un espacio para 90 oficinas aproximadamente en el que se labora en horario de oficina de lunes a viernes. En primer lugar, el edificio caso de estudio se simuló con las tres herramientas seleccionadas anteriormente, con el fin de determinar su aplicabilidad para el caso colombiano en cuanto a condiciones climáticas, materiales usados en la construcción del edificio y horarios de ocupación, entre otros. A continuación, se presentan los resultados de las simulaciones.

Las superficies del modelo en las herramientas de simulación se ajustaron lo máximo posible al caso real. Sin embargo, debido a las características de cada herramienta, estas superficies no coincidían exactamente con los datos reales del edificio. Estas condiciones se tuvieron en cuenta en los análisis de resultados para cada herramienta de simulación (Gavilán Casal, 2015). En cuanto al sistema de aire acondicionado del edificio, este se simuló en las tres herramientas como un sistema en el que están integrados la unidad de condensación y evaporación con la implementación de ductos hacia las zonas a suministrar aire acondicionado. El edificio caso tiene un sistema “partido” (split), unidades de condensación y evaporación independientes, las cuales se simularon con las capacidades idénticas. El edificio caso no tiene sistemas primarios, es decir, sistemas de bombas, chiller, torre de enfriamiento, etc.

##### 4.1.1 Calener

Esta herramienta no tiene la posibilidad de importar archivos climáticos de cualquier región del mundo. Tiene por defecto una base de datos de archivos climáticos de las 50 localidades capitales de provincia españolas (MINETAD, 2009). Por tal motivo, se hizo una revisión de las diferentes localidades de España en sus características climáticas, con el fin de seleccionar la región más semejante a la ciudad de Medellín, Colombia, (donde se encuentra ubicado el edificio bajo estudio) en aspectos de temperatura promedio al año y precipitaciones de lluvia por año. Por lo tanto, se hizo la simulación con el archivo climático de la provincia de Málaga, España, ya que en promedio presenta un comportamiento climático algo similar al caso de estudio. En la Figura 21 se muestra el registro del climograma de Málaga, España.

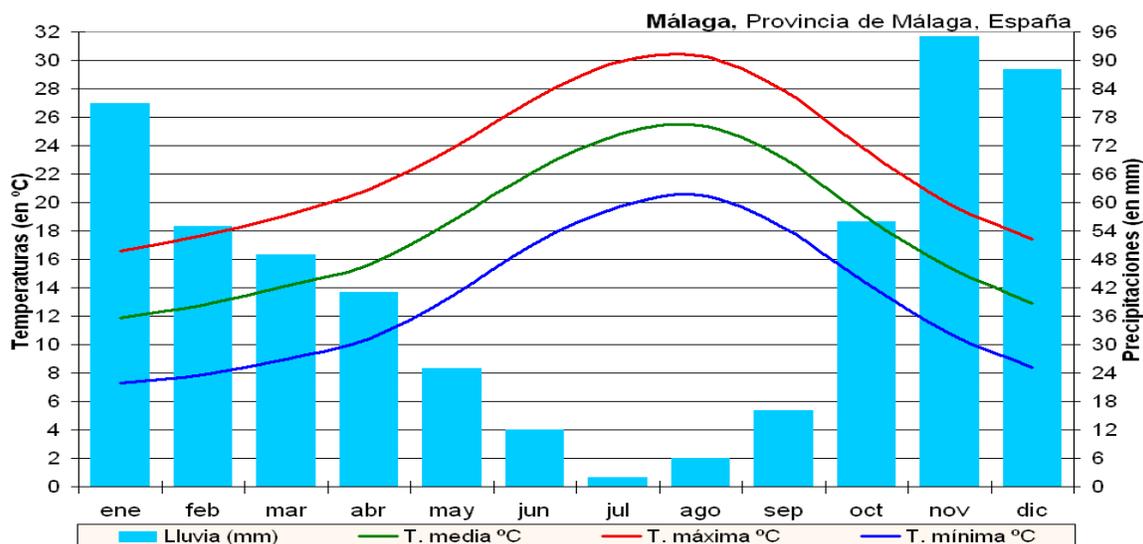


Figura 21. Climograma de Málaga (Aeropuerto).

Fuente: <https://es.wikipedia.org/wiki/Málaga>

Para la elaboración de la geometría del edificio, se dibujan los espacios de forma manual mediante polígonos definidos por sus vértices. Este método disminuye el nivel de detalle en la formación de espacios y cubiertas. La cubierta real del edificio consta de un “plenum” entre el exterior y la zona de oficinas en forma triangular. Este plenum se simuló en Calener de forma rectangular en su superficie exterior y con un volumen similar al del edificio real. En la Figura 22 se muestra una imagen del modelo implementado en Calener.

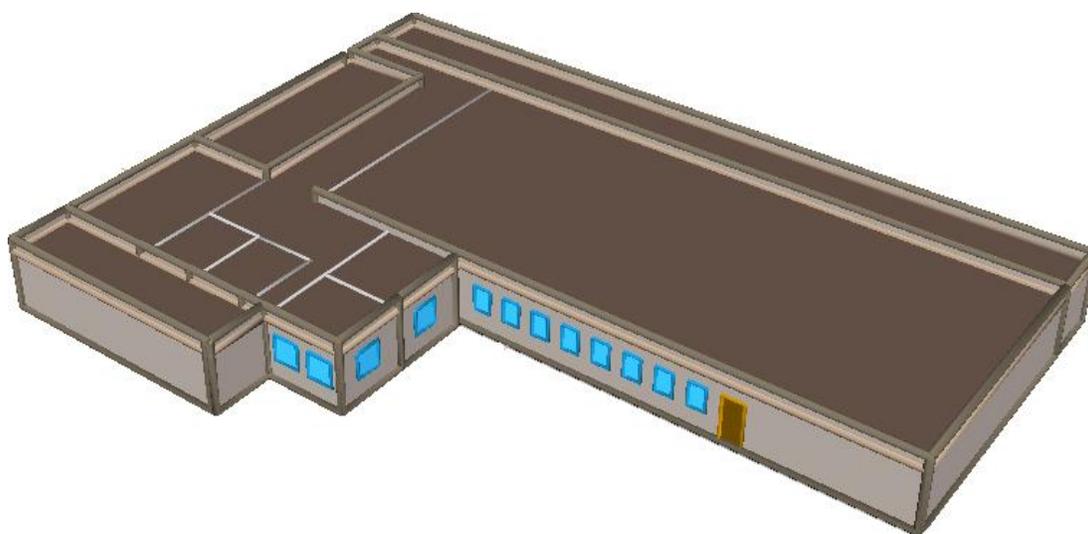


Figura 22. Modelo del edificio simulado en Calener. Fuente: Autor

En la conformación de las capas de la cubierta, se debieron incorporar elementos adicionales para permitir la simulación, ya que la herramienta exigía más componentes de los que tiene el edificio en la realidad. En cuanto a los materiales usados en la simulación, la herramienta permitió la creación de todos los materiales levantados en sitio, clasificados y tabulados en el capítulo anterior. Finalmente, en cuanto a los horarios y debido a que la herramienta no permite modelamiento por fracción de hora, la simulación se hizo incluyendo las actividades laborales en un horario que va desde las 8:00 a.m. hasta las 6:00 p.m., a diferencia del horario real en semana que inicia a las 7:30 a.m. y termina a las 6:00 p.m.

La herramienta presenta los consumos de los siguientes elementos: iluminación, refrigeración, sistema de condensación, bombas y auxiliares, ventiladores, calefacción y agua caliente sanitaria. De acuerdo con la composición del edificio caso, la simulación solo presentó consumos de energía en tres de estos elementos (iluminación, refrigeración y ventiladores), los cuales se muestran mes a mes en la Figura 23. El consumo total anual del edificio se calculó en 57112,5 kWh.

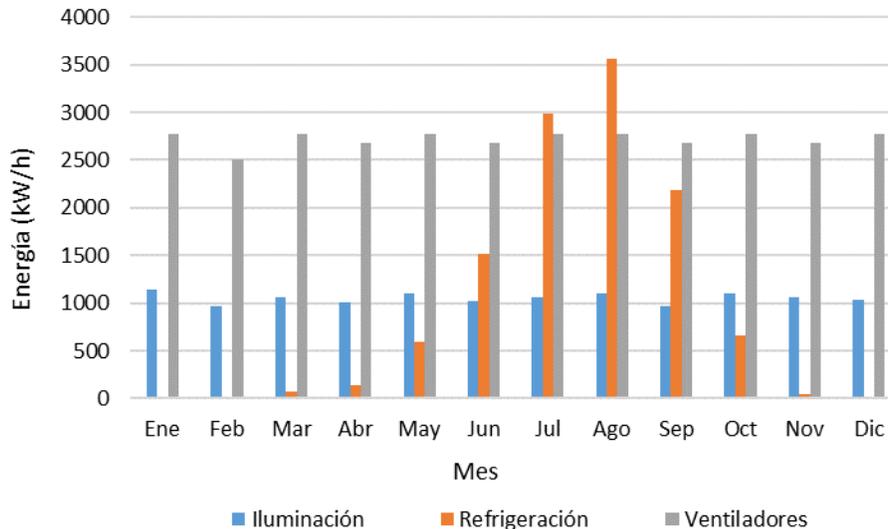


Figura 23. Consumos mensuales de energía calculados con Calener. Fuente: Autor

Como se observa en la Figura 23, en cada mes el mayor consumo se debe a los ventiladores con excepción de los meses de julio y agosto donde el sistema de refrigeración debe trabajar al máximo para lograr un clima confortable en el edificio. Igualmente, se observa como las estaciones del archivo climático español afectan el consumo mensual de la refrigeración. La Figura 24 muestra el porcentaje de

consumo mensual de cada sistema. En total, el 57,2% del consumo anual corresponde a los ventiladores, el 22,1% a la iluminación y el 20,6% a la refrigeración.

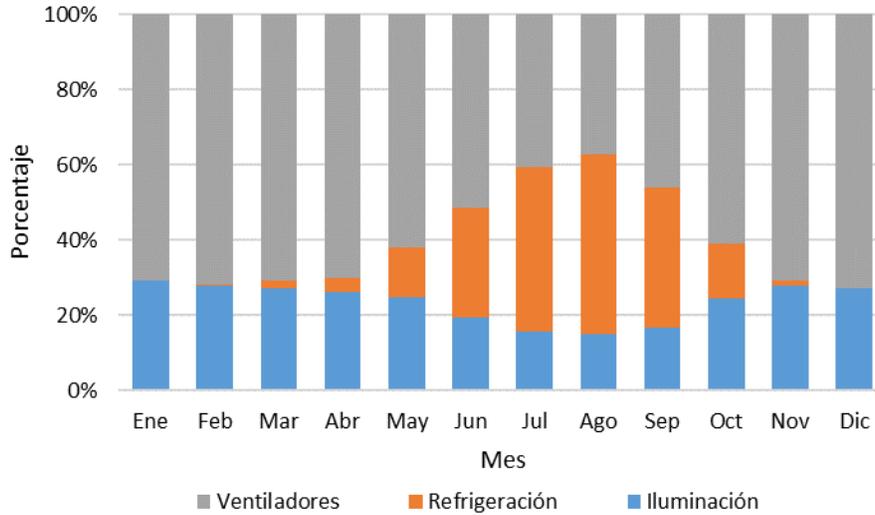


Figura 24. Porcentaje de consumo mensual de cada sistema en Calener. Fuente: Autor

#### 4.1.2 eQuest

Como se ha indicado en capítulos anteriores, las herramientas eQuest y CanQuest son iguales y la única diferencia radica en las unidades de medida. La herramienta CanQuest fue migrada para simular zonas climáticas de Canadá y las unidades de medidas están en SI (Sistema Internacional), mientras que eQuest tiene sus medidas en el sistema inglés. Sin embargo, en las dos herramientas se puede ingresar el archivo climático de cualquier ciudad del mundo en el formato establecido. El edificio caso se simuló en la herramienta eQuest. En esta herramienta, el archivo climático correspondiente al edificio caso, se implementó mediante la conversión de los archivos climáticos de EnergyPlus, extensión .epw a la extensión .bin (el archivo climático de Medellín). Esto permitió tener un nivel de precisión más cercano a la realidad, pues el archivo climático juega un papel definitivo al analizar y valorar resultados.

Por otro lado, tal como con la herramienta Calener, es complejo modelar con exactitud el edificio caso. Sin embargo, esta herramienta a diferencia de Calener, permite importar planos desde algunas herramientas de dibujo (DWG, etc.) como guía de diseño, presentando menos limitantes que Calener. En cuanto al modelado del plenum, se presentó la misma dificultad que en Calener, por lo tanto, también

se definió de forma rectangular en su superficie exterior y con un volumen similar al del edificio real, y con características térmicas similares. En la Figura 25 se muestra una imagen del modelo implementado en eQuest.

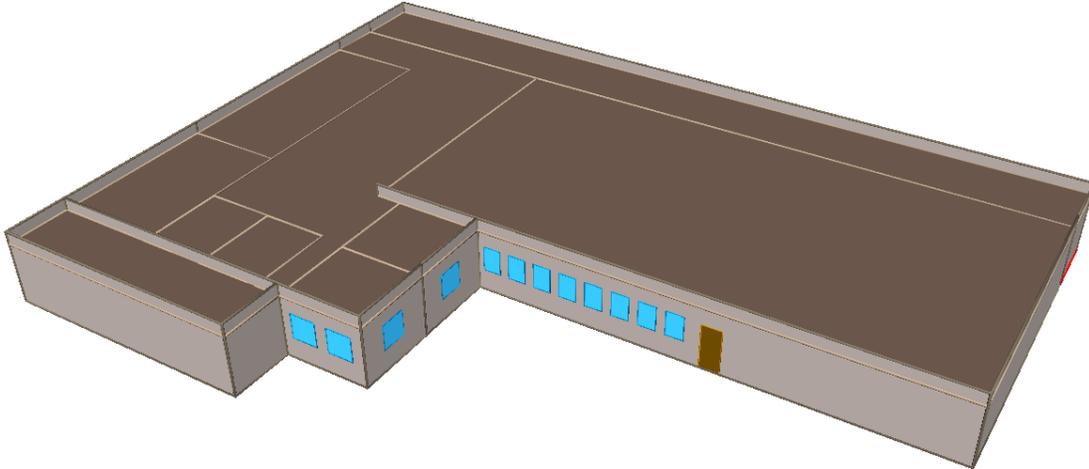


Figura 25. Modelo del edificio simulado en eQuest. Fuente: Autor

En cuanto a los materiales usados en la simulación, la herramienta permitió la creación de todos los materiales levantados en sitio, clasificados y tabulados en el capítulo anterior. Finalmente, y al igual que con la herramienta Calener, en cuanto a los horarios y debido a que la herramienta no permite modelamiento por fracción de hora, la simulación se hizo incluyendo las actividades laborales en un horario que va desde las 8:00 a.m. hasta las 6:00 p.m., a diferencia del horario real en semana que inicia a las 7:30 a.m. y termina a las 6:00 p.m.

A diferencia de Calener, la herramienta eQuest presenta consumos en una mayor cantidad de elementos, permitiendo distinguir en mayor detalle los sistemas y el uso de energía. De acuerdo con la composición del edificio caso, la simulación solo presentó consumos de energía en cuatro de estos elementos: iluminación ambiente (la que se utiliza en pasillos), iluminación de trabajo (la que se utiliza en oficinas), equipos misceláneos, refrigeración y ventiladores, los cuales se muestran mes a mes en la Figura 26. Los valores referentes a iluminación se unificaron en un solo elemento. El consumo total anual del edificio se calculó en 110185,0 kWh.

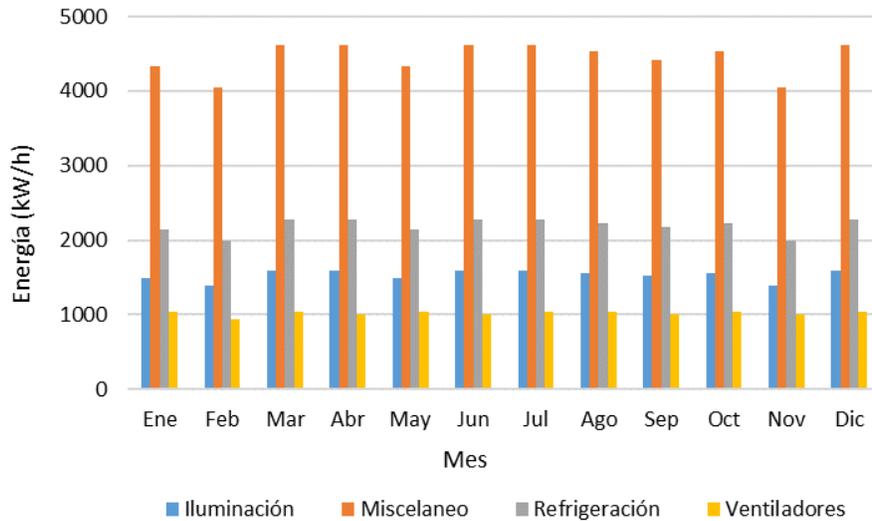


Figura 26. Consumos mensuales de energía calculados con eQuest. Fuente: Autor

Como se observa en la Figura 26, en cada mes el mayor consumo se debe a los equipos misceláneos, lo cual incluye los equipos eléctricos, las cargas internas, entre otras. En este caso, los consumos mensuales de cada uno de los sistemas son muy similares ya que se simuló con el archivo climático de la ciudad de Medellín, la cual no tiene estaciones. La Figura 27 muestra el porcentaje de consumo mensual de cada sistema. En total, el 48,4% del consumo anual corresponde a los equipos misceláneos, el 23,8% a la refrigeración, el 16,7% a la iluminación y el 11,1% a los ventiladores.

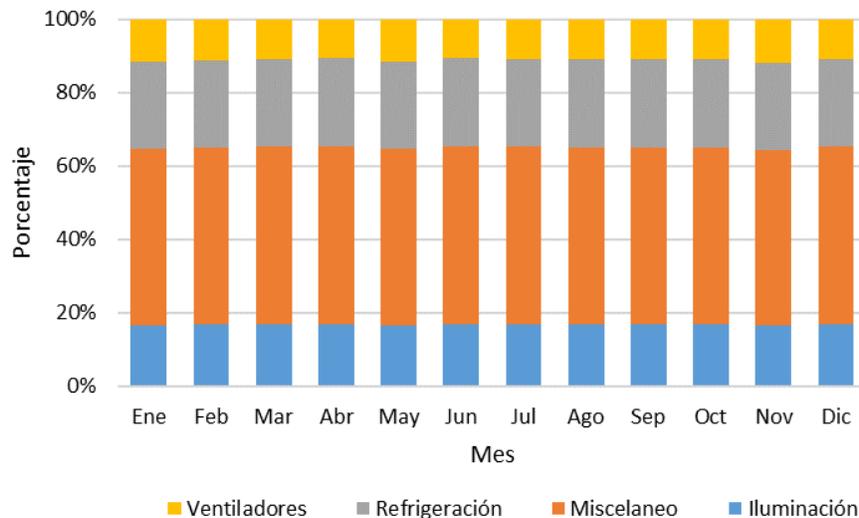


Figura 27. Porcentaje de consumo mensual de cada sistema en eQuest. Fuente: Autor

### 4.1.3 EnergyPlus

La simulación con esta herramienta está compuesta por dos etapas: el modelamiento de planta del edificio caso desde la herramienta Sketch Up, teniendo todo el potencial de una herramienta de diseño 3D, y el uso del plugin Open Studio para el cálculo de los consumos. Por lo tanto, el edificio se puede modelar tan fiel como se desee y fue posible realizar el modelo con la forma del techo original y con sus componentes tal como es el edificio caso. En la Figura 28 se muestra una imagen del modelo implementado en Sketch Up.

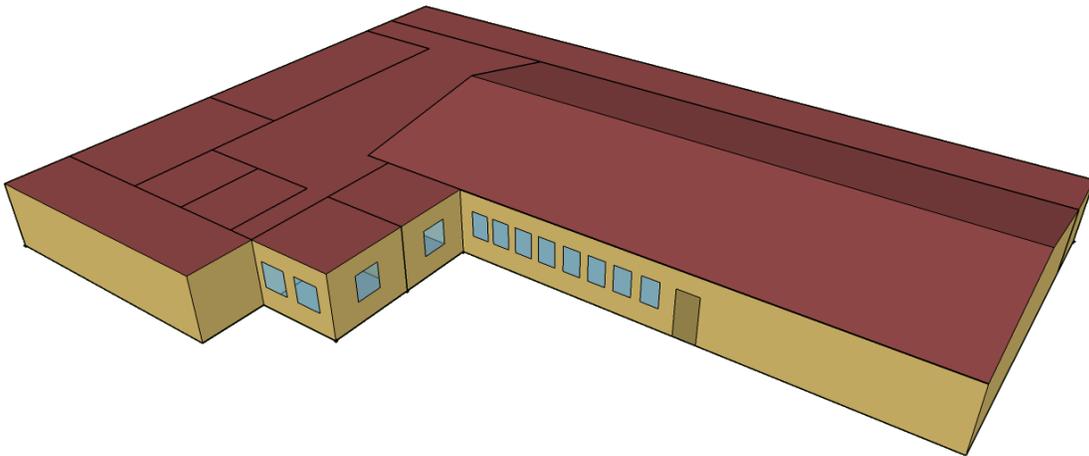


Figura 28. Modelo del edificio simulado en EnergyPlus. Fuente: Autor

Para la elaboración de la geometría, se dibuja la envoltura del edificio, se da forma y se adicionan ventanas y puertas, después se representan condiciones de contorno, tipos de espacio, tipo de zonas y definición de pisos. Realizada esta etapa, desde el mismo Sketch Up, se ingresa al plugin Open Studio en el que se modela lo referente a ubicación, archivo climático (de cualquier parte del mundo), horarios de funcionamiento, materiales de construcción, zonas y cargas térmicas, se instalan sistemas de aire acondicionado, ductos, etc. Después de modelado todos los parámetros del edificio caso, se realiza la simulación. En cuanto a horarios, a diferencia con las otras dos herramientas se definen tan precisos como se requieran: porcentajes de cargas, de tiempo de trabajo, etc. por fracciones de horas a fracciones de minutos.

Al igual que la herramienta eQuest, EnergyPlus presenta consumos en una mayor cantidad de elementos, permitiendo distinguir en mayor detalle los sistemas y el uso de energía. De acuerdo con la composición del edificio caso, la simulación solo presentó consumos de energía en cuatro de estos elementos: iluminación, equipos

interiores, enfriamiento y ventiladores, los cuales se muestran mes a mes en la Figura 29. Los valores referentes a iluminación se unificaron en un solo elemento. El consumo total anual del edificio se calculó en 96690,9 kWh.

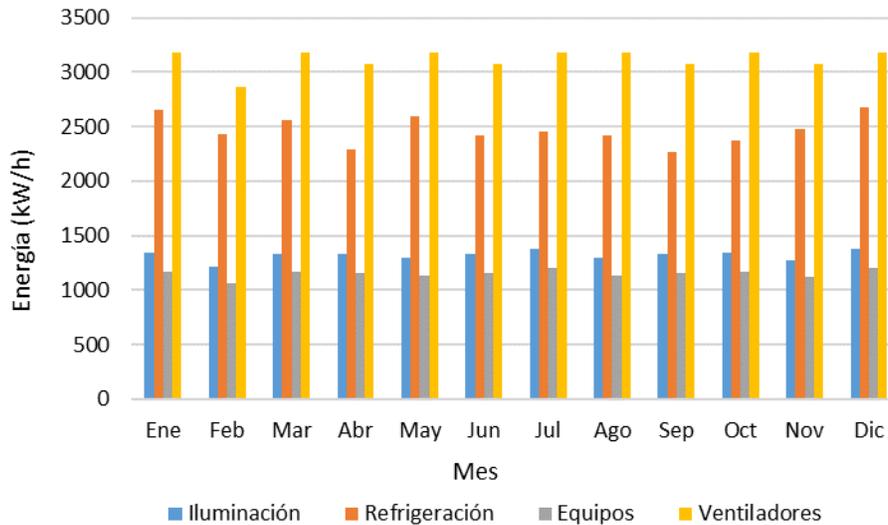


Figura 29. Consumos mensuales de energía calculados con EnergyPlus. Fuente: Autor

Como se observa en la Figura 29, en cada mes el mayor consumo se debe a los ventiladores. La Figura 30 muestra el porcentaje de consumo mensual de cada sistema.

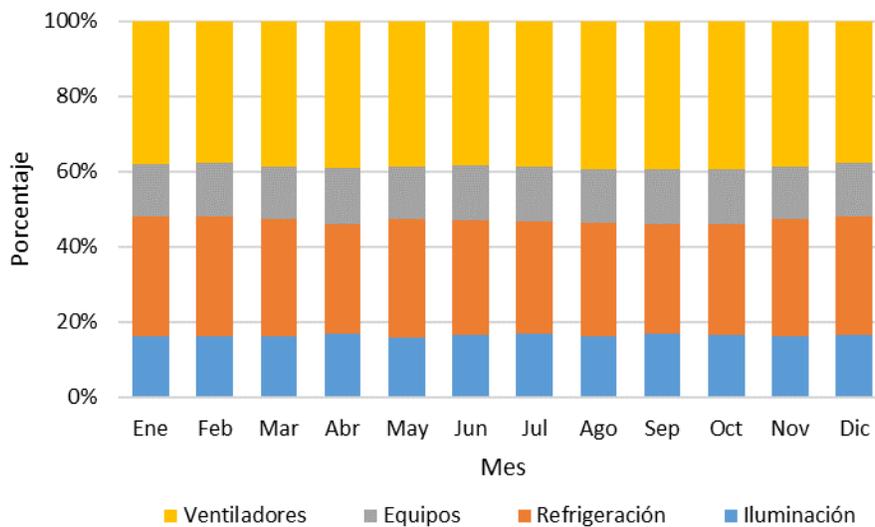


Figura 30. Porcentaje de consumo mensual de cada sistema en EnergyPlus.

Fuente: Autor

En total, el 38,7% del consumo anual corresponde a los ventiladores, el 30,6% a la refrigeración, el 16,4% a la iluminación y el 14,3% a los equipos interiores.

## 4.2 Comparación entre herramientas

Después de realizada las simulaciones del edificio caso en las tres herramientas de eficiencia energética, se analizaron los resultados con el fin de determinar la aplicabilidad de las mismas al caso colombiano y por lo tanto definir con cuál de ellas se evaluarían diferentes técnicas de ahorro energético. La adaptación de las tres herramientas al caso colombiano, se llevó a cabo solo hasta donde lo permitió cada una de ellas después de haber sido exploradas y modelado el edificio caso.

En la Figura 31 se comparan los consumos totales mensuales del edificio obtenidos con las tres herramientas. Se puede observar una similitud en los resultados obtenidos entre las herramientas eQuest y EnergyPlus, manteniendo un consumo más o menos similar durante todo el año. En promedio, la diferencia de consumo mensual entre estas dos herramientas fue de 14,0%, tomando como referencia la herramienta EnergyPlus. Esto se puede deber a las consideraciones que se tuvieron que hacer con la herramienta eQuest y que fueron explicadas en la sección 4.1.2.

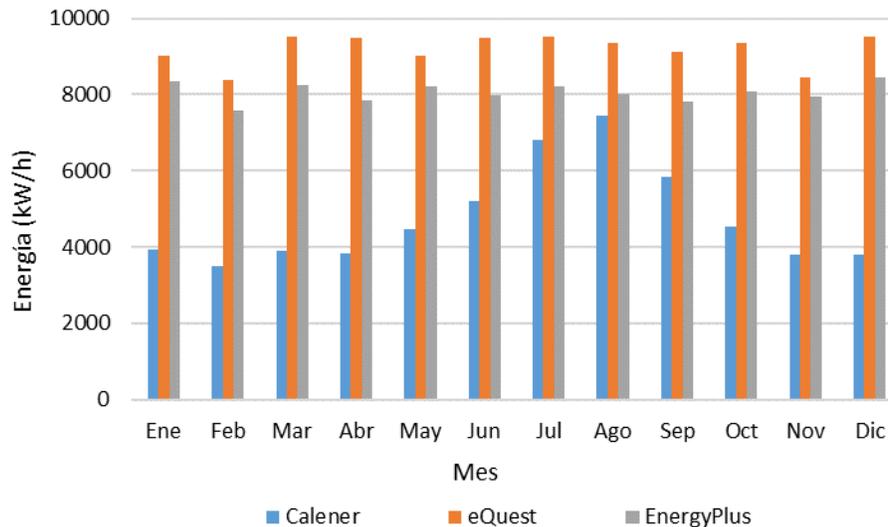


Figura 31. Consumos totales mensuales obtenidos con las tres herramientas.  
Fuente: Autor

Por otro lado, los datos de consumo calculados con la herramienta Calener, muestran una tendencia marcada por las estaciones identificadas en el archivo climático que se utilizó. Los resultados de esta herramienta, comparados con las otras dos, muestran diferencias de entre el 40 y el 50%, debido principalmente a las diferencias en las condiciones climáticas usadas en la simulación. La Figura 32 muestra el porcentaje de consumo anual de cada sistema obtenido con las tres herramientas.

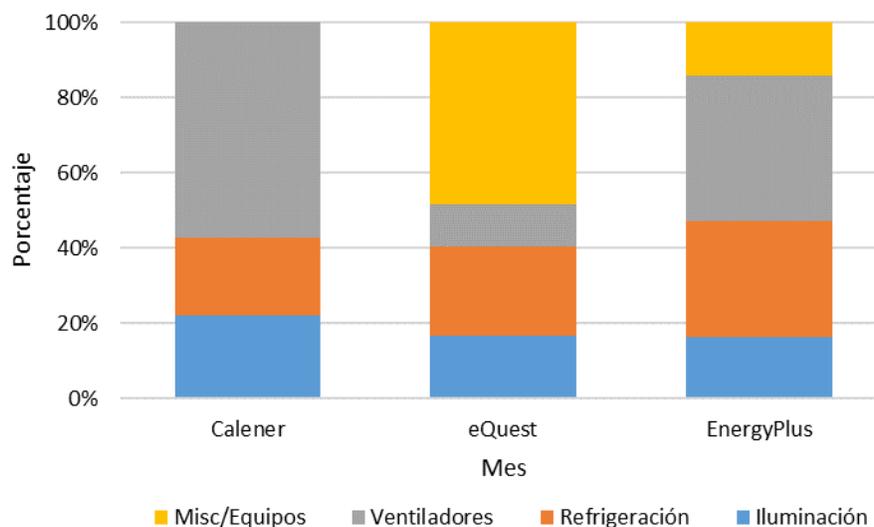


Figura 32. Porcentaje de consumo anual de cada sistema con las tres herramientas.  
Fuente: Autor

En primer lugar, se observa que la herramienta Calener solo arrojó resultados en tres sistemas (iluminación, ventilación y refrigeración), mientras que eQuest y EnergyPlus muestran resultados en los mismos tres sistemas y en uno adicional. En el caso de eQuest se denomina equipos misceláneos y en EnergyPlus se denomina equipos interiores. Al realizar una comparación entre los consumos anuales calculados con las herramientas eQuest y EnergyPlus, las cuales arrojaron resultados similares, se encuentra que en cuanto a iluminación la diferencia entre ellas fue de 16,2% mientras que en refrigeración la diferencia fue de 11,4%. Los sistemas de equipos misceláneos o equipos internos y ventiladores presentan diferencias notables debido a los elementos de consumo que considera cada herramienta, pero al sumar estos dos sistemas la diferencia entre ellas es del 27,9%.

La herramienta eQuest considera en el reporte de resultados una categoría de “equipos misceláneos”, en la cual se reporta el consumo de energía de todos los

equipos interiores que afectan las cargas de los espacios, como por ejemplo consumos de los equipos eléctricos, consumos de los equipos para los diferentes procesos, consumos de cargas en los circuitos cerrados de procesos (HVAC, ACS), etc. También considera una categoría de “ventiladores” en la que se reporta el consumo de todos los ventiladores usados en el proceso de ventilación del sistema HVAC, tales como los de suministro, retorno y de escape. Por otro lado, EnergyPlus considera en el reporte de resultados una categoría denominada “equipos interiores” en la que solo se considera el consumo de equipos eléctricos que son usados dentro de cada espacio, como los equipos de cómputo, mientras que en la categoría “ventiladores” incluye el consumo de estos elementos y todos los demás asociados a los procesos de HVAC necesarios para el acondicionamiento del aire en los espacios. En esto radica principalmente la diferencia en la presentación de resultados entre estas dos herramientas. En la Tabla 15 se presenta un resumen de los consumos anuales calculados por las tres herramientas.

Tabla 15. Consumos anuales calculados con las tres herramientas (kWh). Fuente: Autor

	Calener	eQuest	EnergyPlus
Iluminación	32927,4	18418,0	15846,9
Refrigeración	30672,7	26246,9	29611,7
Ventiladores	85063,6	12231,0	37392,6
Misc/Equipos	0,0	53289,1	13839,6

En resumen, la diferencia entre los resultados de la simulación de las tres herramientas sobre el edificio bajo estudio, se debe principalmente al archivo climático usado con la herramienta Calener ya que no permite simular un proyecto fuera de las 50 localidades de España que tiene en su base de datos. A pesar de existir ciudades en España que pudieran tener un clima similar a algunas ciudades colombianas, el hecho de que España cuente con estaciones marca una diferencia muy grande, especialmente en los aspectos de climatización. Este factor se aprecia en la Figura 23 en la que el sistema de refrigeración demanda más energía en las estaciones más calientes del año (período mayo-agosto) para mantener los estados de confort al interior del edificio. También se nota la influencia del nivel de detalle que se pudo implementar en la herramienta eQuest, ya que las diferencias en la geometría y los horarios influyeron en los cálculos de consumo. La Tabla 17 resume las ventajas y desventajas de cada herramienta identificadas durante el proceso de simulación.

Desafortunadamente, no fue posible evaluar la exactitud de los resultados comparándolos con mediciones de consumo en el edificio ya que los sistemas están divididos por varios pisos y no se podían aislarlos para tomar medidas. Por lo tanto, la selección de la herramienta con el fin de evaluar diferentes estrategias para la reducción del consumo energético de acuerdo a las posibilidades de modelamiento, se hizo con base en las prestaciones de las herramientas y su aplicabilidad al caso colombiano.

Analizadas las ventajas y desventajas de cada herramienta expuestas en la Tabla 17, así como su aplicabilidad al caso colombiano, se escogió la herramienta EnergyPlus para la evaluación mediante simulación de diferentes medidas de ahorro energético que se pudieran implementar en el edificio bajo estudio. La Tabla 16 recoge los detalles de exactitud en el modelo y aplicabilidad de cada una de las herramientas en los principales aspectos a evaluar.

Tabla 16. Revisión de los aspectos a considerar para la simulación Fuente: Autor

Aspecto	Calener	eQuest	EnergyPlus
Permite modelar en detalle la geometría del edificio			X
Permite cargar el archivo climático de cualquier ciudad		X	X
Permite modelar en detalle los horarios de funcionamiento de los sistemas			X
Permite modelar cualquier tipo de material	X	X	X
Permite modelar cualquier tipo de sistema HVAC	X	X	X

Tabla 17. Ventajas y desventajas de cada una de las herramientas. Fuente: Autor

	Calener	eQuest	EnergyPlus
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiempo de simulación muy corto (algunos segundos).</li> <li>• Cálculo de niveles de CO<sub>2</sub> emitidos al ambiente para obtener certificación del edificio (España).</li> <li>• Base de datos de comportamiento de los componentes que permite la simulación a carga parcial de los sistemas de acondicionamiento de aire.</li> <li>• Generación de los datos en los archivos de entrada es relativamente fácil.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiempo de simulación muy corto (algunos segundos).</li> <li>• Base de datos de comportamiento de los componentes que permite la simulación a carga parcial de los sistemas de acondicionamiento de aire.</li> <li>• Generación de los datos en los archivos de entrada es relativamente fácil.</li> <li>• Importación de planos desde algunas herramientas de dibujo CAD.</li> <li>• Visualización del modelo en 3D y 2D.</li> <li>• Importación de archivo climático mediante la conversión de archivos *.epw a *.bin.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dos motores de cálculo: DOE-2 y BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics), el último es un motor especializado en cálculo de cargas termodinámicas en edificios.</li> <li>• La respuesta del edificio a cargas térmicas se calcula simultáneamente con la respuesta de la instalación. Esto incrementa el rango de condiciones que se pueden analizar, incluyendo aquellas donde las temperaturas del edificio no están siempre controladas.</li> <li>• La interfaz gráfica para modelar el edificio caso, se realiza mediante la herramienta de dibujo Sketch Up, entre muchas otras, lo permite generar el modelo del edificio en una manera más real al edificio caso, esta característica facilita la importación de planos de dibujos a partir de herramientas CAD.</li> <li>• Dada la robustez del interfaz gráfico, permite visualizar el modelo de la planta en todas las vistas posibles.</li> </ul>

---

			<ul style="list-style-type: none"><li>• Permite modelar con mucho detalle los sistemas hidráulicos (consumos de agua fría y ACS).</li><li>• Permite simular cualquier ciudad del mundo en sus extensiones originales de los archivos climáticos *.epw.</li></ul>
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"><li>• Motor de cálculo que no tiene actualización desde hace más de una década.</li><li>• No es posible modelar con exactitud el edificio (ej. No se pueden modelar ventanas circulares).</li><li>• Los horarios no se pueden modelar con exactitud ya que solo permite pasos de a una hora.</li><li>• No se pueden modelar edificaciones en un país diferente al de España.</li><li>• Limita la vista de dibujo del edificio solo en modo 3D.</li><li>• No permite discriminar las cargas misceláneas para su análisis.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Motor de cálculo que no tiene actualización desde hace más de una década.</li><li>• No es posible modelar con exactitud el edificio (ej. No se pueden modelar ventanas circulares).</li><li>• Los horarios no se pueden modelar con exactitud ya que solo permite pasos de a una hora.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Complejidad en el aprendizaje del uso de la herramienta.</li><li>• Tiempo que se toma la simulación (varios minutos).</li></ul>

---

### 4.3 Medidas de ahorro energético evaluadas

De acuerdo con una inspección general al edificio bajo estudio se pudieron identificar algunos problemas que afectan el consumo de energía del mismo. Respecto a la fachada, los marcos de las ventanas, así como los acristalamientos, no son los más adecuados para disminuir la carga térmica al interior de los espacios. Igualmente, las puertas y ventanas presentan un alto nivel de infiltraciones ya que estos elementos no tienen implementado ningún medio para contener el aire de circulación disminuyendo el tiempo de renovación del sistema de acondicionamiento de aire. Finalmente, en el cielo falso se encuentran dos escapes de aire sin retorno al sistema de aire acondicionado (ver Figura 33).



Figura 33. Escape en el retorno del sistema de aire acondicionado. Fuente: Autor

Por otro lado, el sistema de acondicionamiento de aire se encuentra sobredimensionado. De acuerdo con un cálculo realizado con la ayuda de la herramienta “CoolPack” (herramienta especializada en simulación y cálculo de sistemas de aire acondicionado de acuerdo con las cargas térmicas y el tipo de paredes, entre otros elementos), para un área idéntica al edificio bajo estudio se requiere un sistema de acondicionamiento de aire de 16,87 kW para cubrir la demanda en carga térmica en general. Sin embargo, el edificio bajo estudio tiene instalado un sistema de 28 kW. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la simulación de diferentes estrategias para reducir el consumo de energía, realizadas con la herramienta EnergyPlus.

### 4.3.1 Fachada

Las ventanas con acristalamiento sencillo son las más ineficientes y las que ofrecen mayores pérdidas de energía. Una solución es sustituirlas por sistemas de doble ventana, que consiguen reducir las pérdidas. Igualmente, colocando láminas o filtros solares se puede mejorar las características térmicas de los acristalamientos. Los marcos de puertas y ventanas también influyen en las pérdidas de energía. Aquellos en madera favorecen un nivel adecuado de aislamiento dada su baja conductividad, pero los marcos de aluminio o hierro presentan grandes pérdidas térmicas debido a su alta conductividad. Por otro lado, para tapar las rendijas y disminuir las infiltraciones de aire que se pueden producir por las puertas y ventanas, se pueden emplear medios sencillos y baratos como la silicona, masilla o burletes (tiras autoadhesivas de material aislante que se fijan en el canto de puertas y ventanas para evitar que entre o salga aire). Estos elementos son muy fáciles de instalar y muy baratos.

Como medida de ahorro energético se evaluó el cambio de vidrio en las ventanas. En la actualidad se tiene un vidrio de 4 mm de espesor con una transmitancia térmica  $U = 1,98 \text{ W/m}^2\text{K}$  (valor aproximado de acuerdo con las características analizadas en sitio). Se propuso un cambio de acuerdo con la norma ASHRAE 189.1-2009, para una zona térmica similar a la ubicación del edificio, que establece que el vidrio debe tener como mínimo una transmitancia térmica  $U = 2,61 \text{ W/m}^2\text{K}$  y un espesor de 6 mm. El costo aproximado para el cambio de las ventanas incluyendo mano de obra es de \$ 3'500.000. Por otro lado, el mejoramiento en los retornos de aire, lo que consiste en disminución en las infiltraciones, reposición de techo falso en dos cuadrantes faltantes (un mantenimiento en general), tiene un costo aproximado de \$ 500.000.

Esta medida generaría un ahorro anual de 992,6 kWh lo que corresponde al 1,0% de la energía consumida por el edificio. Como se observa en la Figura 34, el ahorro se produce en los sistemas de refrigeración (706,1 kWh) y de ventilación (286,5 kWh) ya que la mejora en el aislamiento afecta fundamentalmente estos sistemas. Considerando un precio de \$514,25 por kW/h de acuerdo con una tarifa industrial y comercial, en el año esta medida podría generar un ahorro \$510.400 por lo que aproximadamente en 7,8 años se podría recuperar la inversión realizada.

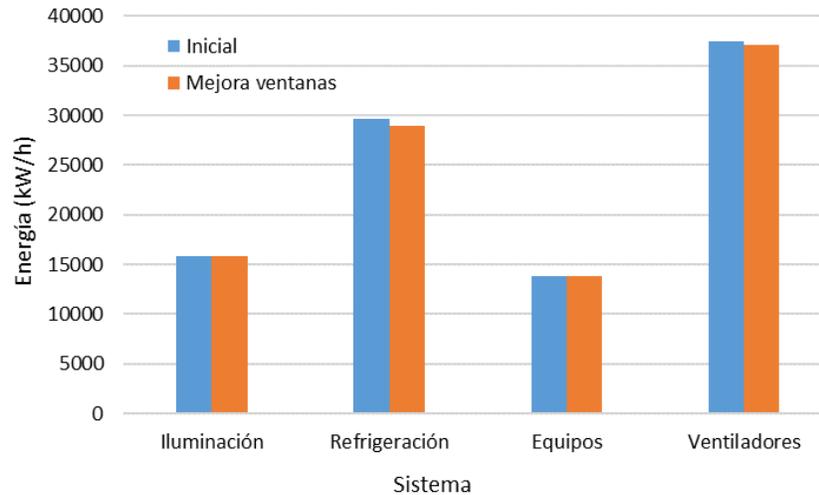


Figura 34. Comparación de consumos con mejoras en las ventanas. Fuente: Autor

#### 4.3.2 Iluminación

La medida de ahorro energético que se evaluó consistió en implementar lámparas de alta eficiencia en algunas zonas. El caso real presenta de acuerdo con la información base, unas lámparas que en promedio tienen una eficiencia de  $18 \text{ W/m}^2$  en salas de reuniones, mientras que en la zona de oficinas las lámparas tienen en promedio una potencia de  $7 \text{ W/m}^2$  (iluminación LED). Se propone reemplazar las lámparas de las cinco salas de reuniones por las mismas de la zona de oficinas. El cambio de 13 lámparas en total tiene un costo aproximado de \$ 2'100.000.

Esta medida generaría un ahorro anual de 7600,6 kWh lo que corresponde al 7,9% de la energía consumida por el edificio. Como se observa en la Figura 35, el ahorro se produce principalmente en el sistema de iluminación (4075,6 kWh) y como se mencionó anteriormente en lo referente a climatización: refrigeración (1803,0 kWh) y ventilación (1722,0 kWh). En cuanto a costos, esta medida podría generar un ahorro \$ 3'908.609 por lo que aproximadamente en menos de un año (6 meses) se podría recuperar la inversión realizada.

#### 4.3.3 HVAC

En muchas ocasiones, un edificio de oficinas que cuente con un buen nivel de aislamiento y un sistema de ventilación adecuado (así como con instalaciones energéticas eficientes) no debería tener la necesidad de instalar un sistema de refrigeración. Cualquier inversión que decida implementar la organización en mejorar estos aspectos para optimizar el comportamiento energético del edificio le

será recompensada con un importante ahorro en la factura energética “de por vida” y un mayor nivel de confort en el trabajo.

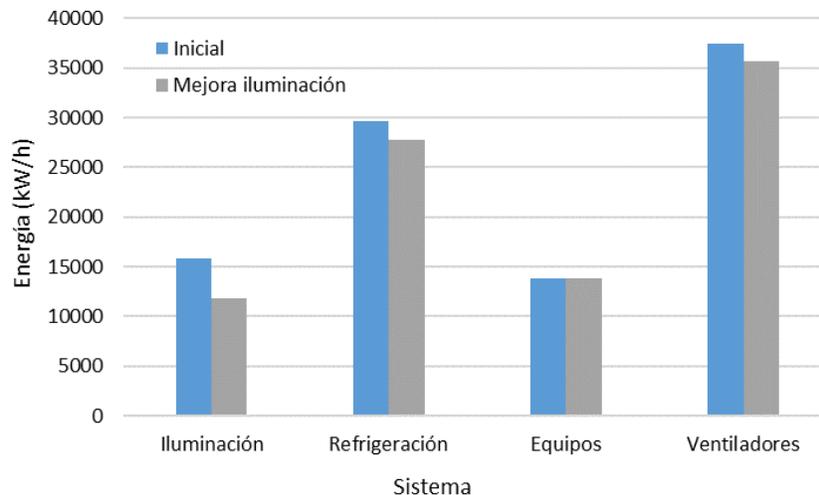


Figura 35. Comparación de consumos con mejoras en la iluminación. Fuente: Autor

En el caso de instalar un equipo de aire acondicionado en la oficina, es conveniente seleccionar un modelo de bajo consumo y con un elevado índice de eficiencia energética (EER). Los distintos equipos presentes en la oficina, además de consumir energía, también pierden gran parte de ella en forma de calor con su uso, aumentando la carga térmica en el interior de las instalaciones e influyendo notablemente en la demanda de energía del aire acondicionado de la oficina.

El sistema del edificio bajo estudio fue diseñado para un caudal de 11800 m<sup>3</sup>/h, mientras que de acuerdo con las recomendaciones RITE, para esta área y el nivel de ocupación, el caudal nominal debe ser de aproximadamente 4800 m<sup>3</sup>/h. Si se adicionara un margen del 25% por renovaciones en infiltraciones y escapes en los ductos, se puede asumir un caudal de 6000 m<sup>3</sup>/h como requerimiento máximo. La medida de eficiencia energética aplicada al sistema HVAC consistió en reducir el caudal y cambiar el motor de velocidad constante a velocidad variable. Esta reconversión tiene un costo aproximado de \$ 15'000.000.

Esta medida generaría un ahorro anual de 8560,6 kWh lo que corresponde al 8,9% de la energía consumida por el edificio. Como se observa en la Figura 36, y como es de esperar, el ahorro se produce en los sistemas que apoyan la climatización: refrigeración (1615,1 kWh) y ventilación (6945,5 kWh). Esta medida generaría un ahorro importante de dinero al año (\$ 4'402.289), sin embargo, debido a que la

inversión inicial es alta, aproximadamente en 3,4 años se podría recuperar la inversión realizada.

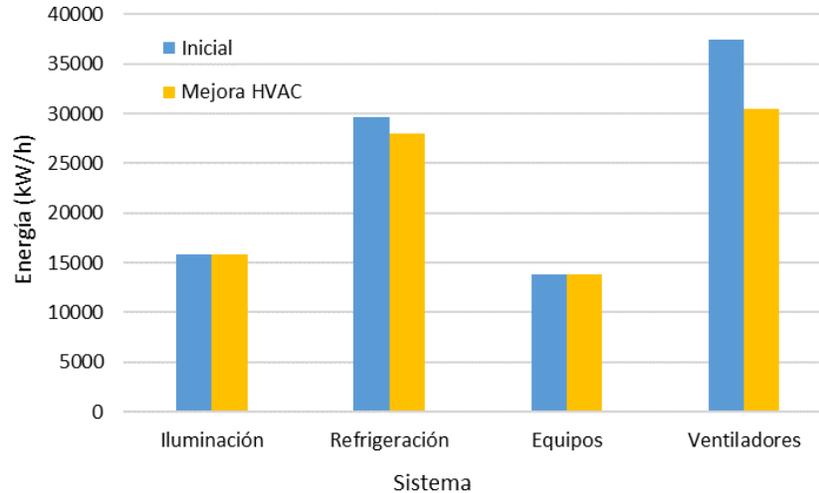


Figura 36. Comparación de consumos con mejoras en el sistema HVAC. Fuente: Autor

#### 4.3.4 Equipos eléctricos

En el edificio bajo estudio, los trabajadores suspenden sus actividades una hora al día para almorzar. Sin embargo, los equipos de cómputo y ofimáticos permanecen encendidos durante ese tiempo. La medida de ahorro energético que se evaluó consistió en simular que durante la jornada de almuerzo todos los equipos permanecieran apagados. Esta actividad no tiene un costo directo asociado ya que se trata de un proceso de concientización del personal que trabaja en la oficina y consiste en modificar los hábitos de los trabajadores.

Esta medida generaría un ahorro anual de 924,2 kWh lo que corresponde al 1,0% de la energía consumida por el edificio. Como se observa en la Figura 37, este ahorro se produce en los equipos eléctricos (451,8 kWh) y en el sistema de refrigeración del edificio (472,4 kWh). Ya que esta medida no requiere de una inversión inicial, el tiempo de retorno es inmediato y generaría ahorros anuales de aproximadamente \$ 475.270.

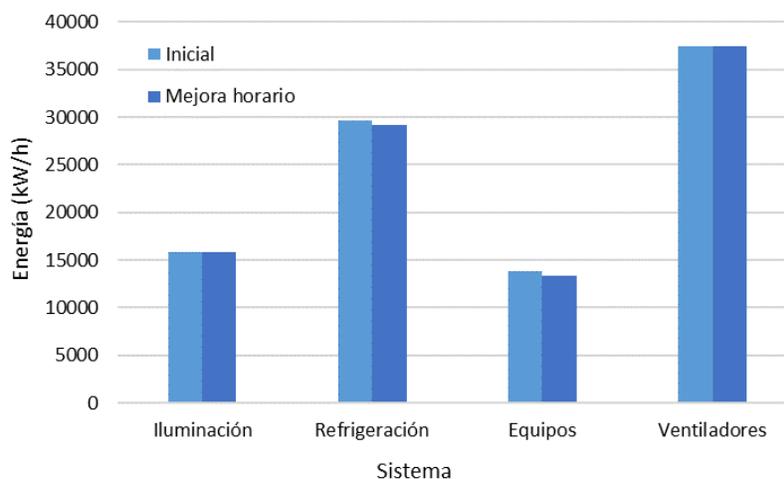


Figura 37. Comparación de consumos con mejoras en los equipos. Fuente: Autor

Finalmente, se simuló el consumo eléctrico del edificio con la aplicación de todas las medidas de ahorro anteriormente descritas. Todas las medidas generarían un ahorro anual de 26283,5 kWh lo que corresponde al 27,2% de la energía consumida por el edificio. Como se observa en la Figura 38, el principal ahorro se produce en el sistema de ventilación (14746,2 kWh), seguido por el de refrigeración (6156,5 kWh), el de iluminación (4929,0 kWh) y finalmente por los equipos eléctricos (451,8 kWh). El costo de implementar todas las medidas sería de \$ 21.100.000 y se generarían ahorros anuales de cerca de \$ 13.516.290 por lo que aproximadamente en 1,6 años se podría recuperar la inversión realizada. En las Tabla 18 y Tabla 19 se presenta un resumen de los ahorros obtenidos con cada una de las medidas de ahorro energético simuladas.

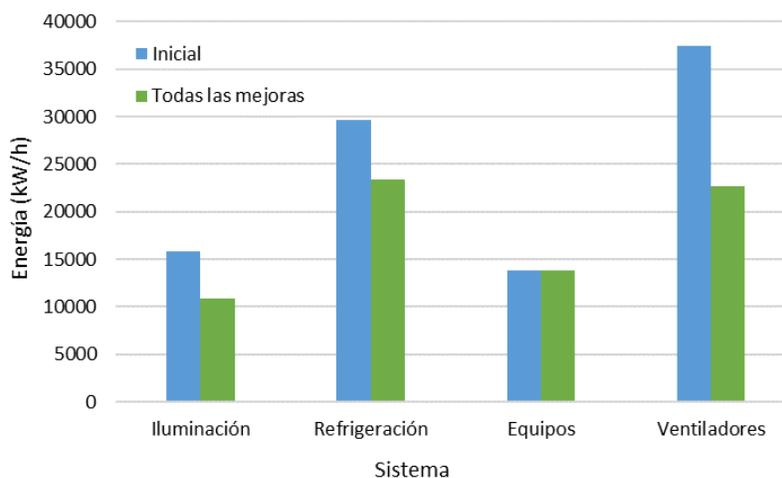


Figura 38. Comparación de consumos con todas las mejoras. Fuente: Autor

Tabla 18. Resumen de los ahorros obtenidos con las mejoras (kWh). Fuente: Autor

Sistema	Mejora ventanas	Mejora iluminación	Mejora HVAC	Mejora horario	Todas las mejoras
Iluminación	0,0	4075,6	0,0	0,0	4929,0
Refrigeración	706,1	1803,0	1615,1	472,4	6156,5
Equipos	0,0	0,0	0,0	451,8	451,8
Ventiladores	286,5	1722,0	6945,5	0,0	14746,2
Total	992,6	7600,6	8560,6	924,2	26283,5

Tabla 19. Resumen de los ahorros obtenidos con las mejoras (\$). Fuente: Autor

Sistema	Mejora ventanas	Mejora iluminación	Mejora HVAC	Mejora horario	Todas las mejoras
Iluminación	\$ -	\$ 2'095.877	\$ -	\$ -	\$ 2'534.738
Refrigeración	\$ 363.112	\$ 927.193	\$ 830.565	\$ 242.932	\$ 3'165.980
Equipos	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 232.338	\$ 232.338
Ventiladores	\$ 147.333	\$ 885.539	\$ 3'571.723	\$ -	\$ 7'583.233
Total	\$ 510.445	\$ 3'908.609	\$ 4'402.289	\$ 475.270	\$ 13'516.290

## 5. Conclusiones y trabajo futuro

### 5.1 Conclusiones

Se identificaron y evaluaron las principales herramientas de simulación integral (todos los sistemas) de desempeño energético de edificios. Esta evaluación se hizo a partir de los datos requeridos para la simulación, el modo de operación, los tipos de sistemas que soporta, la presentación de resultados y su aplicabilidad al caso colombiano. Una vez analizadas estas características y otras determinadas en los manuales de usuario de las diferentes herramientas, se seleccionaron tres (Calener, eQuest y EnergyPlus) para ser utilizadas en la evaluación de un edificio de la ciudad de Medellín, Colombia.

Si bien estas herramientas contienen bases de datos que alimentan las diferentes características utilizadas para la simulación de los edificios, estas bases de datos contienen información referente a los países donde fueron desarrolladas las herramientas. Por lo tanto, los principales aspectos que se consideraron para evaluar la aplicabilidad al caso colombiano consistieron en: utilizar un archivo climático correspondiente a cualquier ciudad colombiana, alimentar el modelo con materiales usados en la construcción de edificios en Colombia y poder simular los diferentes sistemas de consumo de energía utilizados en el país. También se consideraron aspectos relacionados con el nivel de detalle que se podía implementar en el desarrollo del modelo del edificio.

Las tres herramientas seleccionadas tienen diferencias importantes debido al enfoque para el cual fueron desarrolladas. Calener está definida para certificaciones energéticas en España, dedicada a medir a nivel general las emisiones máximas de CO<sub>2</sub> con el ánimo de cumplir la normativa de ese país. La herramienta eQUEST se centra en evaluar niveles de desempeño energético a nivel general en edificios de Estados Unidos, mientras que su versión canQuest se enfocó en su uso para Canadá. Mientras tanto, EnergyPlus fue desarrollada para cualquier parte del

mundo y se especializa en simulación térmica y análisis de desempeño energético en edificios involucrando también los aspectos económicos.

Todas las herramientas permiten la creación de materiales propios y la inclusión de sistemas de consumo de energía eléctrica particulares. En cuanto a estructura, las herramientas Calener e eQUEST tienen la similitud principalmente en el motor de cálculo y adicionalmente en la forma de ingresar la información para cada uno de los sistemas. Por lo tanto, ambas herramientas son amigables con el usuario y fáciles de manejar, pero también comparten los mismos problemas. Es complicado modelar geometrías irregulares y los horarios no permiten pasos inferiores a una hora. Sin embargo, a diferencia de Calener, eQuest si permite cargar un archivo climático de cualquier ciudad del mundo lo que la hace factible para su uso en Colombia.

Por otro lado, la versión original de EnergyPlus es bastante complicada de manejar y no es amigable con el usuario. Sin embargo, a través de diferentes herramientas su uso se ha facilitado enormemente. Por un lado, es posible generar el modelo del edificio en SketchUp. Un software de modelado 3D que permite crear de manera sencilla cualquier estructura por complicada que sea. Por otro lado, la plataforma OpenStudio permite el modelado energético del edificio entero usando EnergyPlus y el análisis avanzado de la iluminación natural usando Radiance. Por todo lo anterior, EnergyPlus fue identificada como la herramienta con mejores prestaciones y de mayor aplicabilidad para el caso colombiano.

La evaluación de las tres herramientas se hizo sobre la fracción (520 m<sup>2</sup>) de un segundo piso de un edificio de oficinas en la ciudad de Medellín. La primera diferencia que se observa en los resultados de las simulaciones tiene que ver con los sistemas de consumo que muestra. Calener solo arrojó resultados en los sistemas de iluminación, ventilación y refrigeración, mientras que eQuest y EnergyPlus muestran resultados en los mismos tres sistemas y en uno adicional (equipos misceláneos y equipos interiores, respectivamente). Al comparar los consumos anuales calculados, las herramientas eQuest y EnergyPlus arrojaron resultados similares con una diferencia promedio de 14%. Mientras que las diferencias con Calener eran en promedio 45% debido al archivo climático usado (Málaga, España).

De acuerdo con lo anterior, se escogió la herramienta EnergyPlus para evaluar diferentes medidas o técnicas para el uso racional y eficiente de la energía eléctrica y se realizó un análisis técnico de cada una de ellas. Estas medidas comprendieron

modificaciones en los materiales de las ventanas, cambios en el sistema de iluminación, mejoras en el sistema refrigeración y cambios en el horario de funcionamiento que afectaba el uso de los equipos internos.

Desde el punto de vista de las ventanas, solo se evaluó el cambio de tipo de vidrio para reducir la ganancia solar. Esta medida generaría un ahorro anual de 1,0% (992,6 kWh) en el consumo de energía centrado principalmente en el sistema de refrigeración (ahorro de 2,4%) y en el de ventilación (ahorro de 0,8%). Esta medida tiene un potencial de ahorro bajo. Presenta variaciones dependiendo de muchos factores: cantidad de ventanas, estado de las ventanas, condiciones climáticas, etc. La implementación de esta medida puede tener un costo alto que depende de la selección que se haga del vidrio, al igual que de la cantidad de ventanas a reemplazar.

En cuanto al sistema de iluminación se evaluó el reemplazo de las luminarias actuales por un sistema de alta eficiencia. El ahorro anual que generaría esta medida es de 7,9% (7600,6 kWh) principalmente en el sistema de iluminación (ahorro de 25,7%), pero también disminuiría la carga térmica interna generando ahorros en el sistema de refrigeración (ahorro de 6,1%) y en el de ventilación (ahorro de 4,6%). Esta medida tiene un potencial de ahorro alto, pero depende del uso que se haga del sistema de iluminación (horas y lámparas). Sin embargo, esta medida puede ser costosa dependiendo de la cantidad de lámparas y del tipo a sustituir.

En cuanto al sistema HVAC, la medida evaluada consistió en modificar el caudal de alimentación tanto en volumen como en el motor que lo producía. Esta medida generaría un ahorro anual de 8,9% (8560,6 kWh) en el consumo de energía centrado principalmente en el sistema de refrigeración (ahorro de 5,5%) y en el de ventilación (ahorro de 18,6%). Esta medida tiene el potencial de ahorro más alto de todas las medidas evaluadas, pero puede ser costosa debido a las intervenciones necesarias para modificar el sistema de refrigeración del edificio.

Por último, en cuanto al uso de los equipos internos, la medida consistió en disminuir en una hora (hora de almuerzo) el funcionamiento de estos, cambiando el comportamiento de las personas. El ahorro anual que generaría esta medida es de 1,0% (924,2 kWh) principalmente en el sistema de equipos internos (ahorro de 3,3%), pero también disminuiría la carga térmica interna generando ahorros en el sistema de refrigeración (ahorro de 1,6%). Esta medida tiene un potencial de ahorro bajo, sin embargo, puede no tener un costo asociado, aunque requiere de la participación de todo el personal.

## 5.2 Trabajo futuro

Como trabajos futuros se plantean:

- Generar un plan de mejora de eficiencia energética en el edificio con base en los resultados de este proyecto.
- Realizar un estudio de consumo eléctrico en el edificio para validar los valores calculados en esta tesis.
- Realizar un estudio detallado del edificio considerando cada espacio de forma particular junto con sus consumos.
- Explorar los potenciales en cálculos de ahorro financiero que tiene la herramienta OpenStudio mediante la interface “Parametric Analysis Tool” (PAT), adaptada al caso colombiano.
- Evaluar otras medidas de eficiencia energética para cada uno de los sistemas propuestos.
- Evaluar económicamente cada una de las medidas de ahorro simuladas para verificar su viabilidad.

## Bibliografía

- Acuity Brands. (2017). Visual Lighting. Estados Unidos. Recuperado de <https://www.visual-3d.com/>
- Alanne, K., Salo, A., Saari, A., & Gustafsson, S.-I. (2007). Multi-criteria evaluation of residential energy supply systems. *Energy and Buildings*, 39(12), 1218–1226. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.01.009>
- Altmann, C. (2010). El Mantenimiento y la Eficiencia Energética, 1–7.
- Attia, S. (2011). State of the art of existing early design simulation tools for net zero energy buildings: a comparison of ten tools. *LEED AP*, (March), 1–45. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:State+of+the+Art+of+Existing+Early+Design+Simulation+Tools+for+Net+Zero+Energy+Buildings:+A+Comparison+of+Ten+Tools#0>
- Attia, S., Hensen, J. L. M., Beltrán, L., & De Herde, A. (2012). Selection criteria for building performance simulation tools: contrasting architects' and engineers' needs. *Journal of Building Performance Simulation*, 5(3), 155–169. <http://doi.org/10.1080/19401493.2010.549573>
- Azar, E., & Menassa, C. C. (2012). A comprehensive analysis of the impact of occupancy parameters in energy simulation of office buildings. *Energy and Buildings*, 55, 841–853. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.10.002>
- Bitzer. (2017). Grupo empresarial Bitzer. Alemania. Recuperado de <https://www.bitzer.de/websoftware/Default.aspx?lng=es&lang=es&country=ec>
- Blondeau, P., Spérandio, M., & Allard, F. (2002). Multicriteria analysis of ventilation in summer period. *Building and Environment*, 37(2), 165–176. [http://doi.org/10.1016/S0360-1323\(01\)00017-8](http://doi.org/10.1016/S0360-1323(01)00017-8)
- Casal, A. G. (2015). Tesis Doctoral: Universidad de Valladolid.
- Chidiac, S. E., Catania, E. J. C., Morofsky, E., & Foo, S. (2011). A screening methodology for implementing cost effective energy retrofit measures in Canadian office buildings. *Energy and Buildings*, 43(2-3), 614–620. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.11.002>

- Cianfrone, C., Norris, N., Roppel, P., & Marceau, M. (2012). Thermal Performance of TwoThree-Dimensional Building Envelope Assemblies and Details for Improving the Accuracy of Whole Building Performance Simulation. In Fifth National Conference of IBPSA (pp. 1–13).
- Clarke, J., Hensen, J., & Janák, M. (1998). Integrated Building Simulation: State-of-the-Art. In Proc. Indoor Climate of Buildings (pp. 1–8).
- Comunicación de la comisión al parlamento europeo, concejo, comité económico y social europeo y al comité de las regiones. (2016). Bruselas.
- Crawley, D. B., Hand, J. W., Kummert, M., & Griffith, B. T. (2005). Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. Ninth International IBPSA Conference, 231–238. <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.027>
- Crawley, D. B., Hand, J. W., Kummert, M., & Griffith, B. T. (2008). Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. Building and Environment, 43, 661–673. <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.027>
- Crossette, B. (2011). Estado de la población mundial 2011.
- Danfoss. (2017). DanCap. Dinamarca. Recuperado de <http://refrigerationandairconditioning.danfoss.mx/knowledge-center/software/dancap/#/>
- DIAL. (2017). DIALux. Alemania. Recuperado de <https://www.dial.de/es/dialux/download/>
- DTU. (2017). CoolPack. Dinamarca. Recuperado de <http://www.en.ipu.dk/Indhold/refrigeration-and-energy-technology/coolpack.aspx>
- Eaton. (2017). Eaton's Crouse-Hinds Division - Luxicon. Estados Unidos. Recuperado de <http://www.cooperindustries.com/content/public/en/crouse-hinds.html>
- Electric Power in Colombia. (2015). Bogotá.
- Emerson. (2017). Refrigeration Load Calculator. Estados Unidos. Recuperado de [http://www.emersonclimate.com/Documents/Resources/Refrigeration\\_Contractor\\_Weekly/Free-Refrigeration-Software.html](http://www.emersonclimate.com/Documents/Resources/Refrigeration_Contractor_Weekly/Free-Refrigeration-Software.html)
- Fabi, V., Andersen, R. V., & Corgnati, S. P. (2011). Description of occupant behaviour in building energy simulation: state-of-art and concepts for improvements. In 12th Conference of International Building Performance Simulation Association (pp. 14–16). Sydney: Conference of International Building Performance Simulation Association.

- Fomento. (2014). Estrategia a largo plazo para la rehabilitación energética en el sector de la edificación en España. En desarrollo del artículo 4 de la Directiva 2012/27/UE. (2014). Ministerio de Fomento, Barcelona, España.
- Gavilán Casal, A. (2015). Análisis comparativo de la eficiencia energética en edificios existentes con diferentes herramientas de simulación energética. Universidad de Valladolid.
- Gero, J. S., D'Cruz, N., & Radford, A. D. (1983). Energy in context: A multicriteria model for building design. *Building and Environment*, 18(3), 99–107. [http://doi.org/10.1016/0360-1323\(83\)90001-X](http://doi.org/10.1016/0360-1323(83)90001-X)
- González, A., & Díaz, M. (2013). Función E Impacto Del Archivo Climático Sobre Las Simulaciones De Demanda Energética. *Habitat Sustentable*, 3, Pp. 75–85.
- Gonzalez, C. P. (2011). Revisión De Los Programas De Simulación Energéticos En Edificaciones. Tesis De Pregrado Universidad Veracruzana, Xalapa Méjico.
- Goods, E., & Series, S. (2010). Deploying Energy-Efficiency and Renewable-Energy Technologies in Residential and Commercial Buildings What are the Trading Opportunities for Developing Deploying Energy-Efficiency and Renewable-Energy Technologies in Residential and Commercial Buildings W, (11).
- Hernández, A. (2007). Bienestar Térmico: Criterios De Diseño Para Ambientes Térmicos Confortables. Notas Técnicas De Prevención 779, Instituto Nacional De Seguridad E Higiene En El Trabajo. España.
- Hirsch, J. J. (2009). Introductory Tutorial, version 3.63.
- Hong, T. (2009). Energyplus Analysis Capabilities for Use in California Building Energy Efficiency Standards Development and Compliance Calculations. Lawrence Berkeley National Laboratory. Estados Unidos.
- Hornero Pérez, R. (2013). Estudio De La Ventilación Natural En Un Edificio Y Su Efecto En El Grado De Confort De Los Ocupantes. Tesis De Maestría Universitat Politécnica De Catalunya. España.
- Horsley, A., France, C., & Quatermass, B. (2003). Delivering energy efficient buildings: a design procedure to demonstrate environmental and economic benefits. *Construction Management and Economics*, 21(4), 345–356. <http://doi.org/10.1080/0144619032000073505>
- IDAE (2009). Calener-Gt, Grandes Edificios Terciarios: Manual De Usuario. Fondo Editorial Instituto Para La Diversificación Y Ahorro De La Energía. Madrid, España.
- ITL Independent Testing Laboratories. (2017). AutoLux. Estados Unidos. Recuperado de <http://www.itlboulder.com/test-equipment/software/autolux.html>

- Jaber-Lopez, J. T. (2011). Are energy certification tools for buildings effective? A Spanish case study. In Proceedings of the 2011 3rd International Youth Conference on Energetics (pp. 1–5).
- Jedrzejuk, H., & Marks, W. (2002). Optimization of shape and functional structure of buildings as well as heat source utilisation example. *Building and Environment*, 37(12), 1249–1253. [http://doi.org/10.1016/S0360-1323\(01\)00100-7](http://doi.org/10.1016/S0360-1323(01)00100-7)
- Joint Research Centre. (2017). Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS). Bélgica: Institute for Energy and Transport. Recuperado de <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>
- Kalogirou, S. A. (2006). Artificial neural networks in energy applications in buildings. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 1(3), 201–216. <http://doi.org/10.1093/ijlct/1.3.201>
- Ke, M., Qi, Z., & Qi, L. (2011). A preliminary study on renewable energy's using mode of tibet residential buildings. In 2011 International Conference on Materials for Renewable Energy & Environment (ICMREE) (pp. 2058–2061).
- Kolokotsa, D. (2007). Artificial intelligence in buildings: A review of the application of fuzzy logic. *Advances in Building Energy Research*, 1, 29–54.
- Kolokotsa, D., Diakaki, C., Grigoroudis, E., Stavrakakis, G., & Kalaitzakis, K. (2009). Decision support methodologies on the energy efficiency and energy management in buildings. *Advances in Building Energy Research*, 3(1), 121–146. <http://doi.org/10.3763/aber.2009.0305>
- Kolokotsa, D., Niachou, K., Geros, V., Kalaitzakis, K., Stavrakakis, G. S., & Santamouris, M. (2005). Implementation of an integrated indoor environment and energy management system. *Energy and Buildings*, 37(1), 93–99. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.05.008>
- Krarti, M. (2000). *Energy Audit of Building Systems*. CRC Press.
- Laustsen, J. (2008a). Energy Efficiency Requirements in Building Codes - Policies for New Buildings.
- Laustsen, J. (2008b). Energy efficiency requirements in building codes, energy efficiency policies for new buildings. International Energy Agency (IEA), (March), 85.
- Ma, Z., Wang, S., Xu, X., & Xiao, F. (2008). A supervisory control strategy for building cooling water systems for practical and real time applications. *Energy Conversion and Management*, 49(8), 2324–2336. <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.01.019>
- Madariaga, D. A. (2013). Diseño e implementación de indicadores de desempeño energético para empresa de telecomunicaciones. Universidad de Chile.

- Madera, F. D. E. (2006). Análisis del comportamiento térmico de un prototipo de vivienda familiar de madera, 10, 87–92.
- Mavrotas, G., Diakoulaki, D., Florios, K., & Georgiou, P. (2008). A mathematical programming framework for energy planning in services' sector buildings under uncertainty in load demand: The case of a hospital in Athens. *Energy Policy*, 36(7), 2415–2429. <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.01.011>
- Mazo, J., Delgado, M., Marin, J. M., & Zalba, B. (2012). Modeling a radiant floor system with Phase Change Material (PCM) integrated into a building simulation tool: Analysis of a case study of a floor heating system coupled to a heat pump. *Energy and Buildings*, 47, 458–466. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.12.022>
- Natural Resources. (2017). RETScreen. Canada: Natural Resources Canada. <http://www.nrcan.gc.ca/energy/software-tools/7465>
- Nghiem, T., & Pappas, G. (2011). Receding-horizon supervisory control of green buildings. *Control Conference (ACC)*, 2011, 4416–4421.
- OxyTech. (2017). Litestar 4D. Italia. <http://www.oxytech.it/software/litestar-suite.asp>
- Palme, M. (2010). La Sensibilidad Energética De Los Edificios. Tesis Doctoral Universidad Politécnica De Cataluña Escuela Técnica Superior De Arquitectura De Barcelona. España.
- Plan Energético Nacional Colombia: Ideario Energético 2050. (2015). Unidad de Planeación Minero Energética, Republica de Colombia. Bogotá, Colombia.
- Rallapalli, H. S. (2010). A Comparison of EnergyPlus and eQUEST Whole Building Energy Simulation Results for a Medium Sized Office Building. ARIZONA STATE UNIVERSITY. Retrieved from [http://129.219.247.59/attachments/56303/content/Rallapalli\\_asu\\_0010N\\_102\\_20.pdf](http://129.219.247.59/attachments/56303/content/Rallapalli_asu_0010N_102_20.pdf)
- Relux. (2017). Relux light simulation tools. Suiza. Recuperado de [http://www.relux.biz/index.php?option=com\\_kunena&Itemid=278&func=view&id=3411&catid=25&lang=es](http://www.relux.biz/index.php?option=com_kunena&Itemid=278&func=view&id=3411&catid=25&lang=es)
- Review, B. P. S., Energy, W., & Saud, A. (2015). El mercado mundial de la energía: Un año de cambios Mercado de la energía en la Unión Europa: Más eficiencia, menor consumo. London, England.
- Riedel, N. (2012). Energy efficient building retrofit strategies for tropical climates: a case study of a Salvadoran university. The Faculty of Humboldt State University.
- Tzempelikos, A., & Athienitis, A. K. (2007). The impact of shading design and control on building cooling and lighting demand. *Solar Energy*, 81(3), 369–382. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2006.06.015>

- UPME (2007). Alumbrado interior de edificaciones para entidades públicas. Guía didáctica para el buen uso de la energía. Bogotá, Colombia.
- U.S. DOE. (2013). Annual Energy Outlook 2015.
- USAID. (2009). Energy Conservation Building Code (Vol. 0).
- van Moeseke, G., Bruyère, I., & De Herde, A. (2007). Impact of control rules on the efficiency of shading devices and free cooling for office buildings. *Building and Environment*, 42(2), 784–793. <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.09.015>
- World Energy Outlook. (2010). *Materials Science and Engineering: A* (Vol. 51). Paris, France. [http://doi.org/10.1016/S1359-6454\(03\)00324-0](http://doi.org/10.1016/S1359-6454(03)00324-0)
- World Energy Resources. (2013). *World Energy Council Report*. London, England. [http://doi.org/http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/09/Complete\\_WER\\_2013\\_Survey.pdf](http://doi.org/http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/09/Complete_WER_2013_Survey.pdf)
- WWF (2008). *Guía De Ahorro Y Eficiencia Energética En Oficinas*. World Wildlife Fund for Nature (WWF) España.