



Institución Universitaria

**Metodología basada en herramientas
computacionales para el uso racional y
eficiente de la energía eléctrica en
edificios terciarios**

Guillermo Carvajal Rincón

Instituto Tecnológico Metropolitano
Facultad de Ingenierías
Medellín, Colombia
2015

Metodología basada en herramientas computacionales para el uso racional y eficiente de la energía eléctrica en edificios terciarios

Guillermo Carvajal Rincón

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

Director:
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
2015

*A mi esposa e hijos, por su
acompañamiento y aliento brindados
durante mi etapa estudiantil.*

Agradecimientos

A los docentes de la Maestría en Gestión Energética Industrial del Instituto Tecnológico Metropolitano, en especial a mi asesor de trabajo de investigación Ing. Adolfo Escobar Ordoñez, PhD, por su acompañamiento y acertada dirección.

Resumen

Reducir el consumo energético de los nuevos edificios y de los existentes y hacerlos más sostenibles es una prioridad en el momento de proyectarlos. Las interacciones complejas y dinámicas que tiene el edificio con su entorno necesitan ser modeladas y simuladas para el análisis. La simulación de edificios es una de las tecnologías clave que contribuyen a la construcción de los futuros edificios y en la rehabilitación de los existentes, los cuales son más eficientes energéticamente, sensibles con la salud y respetuosos del medio ambiente. En este trabajo se presenta una metodología para evaluar el potencial de ahorro energético y hacer uso racional y eficiente del consumo de energía en edificios terciarios. La metodología desarrollada se apoya fundamentalmente en el uso de siete software freeware: herramientas para evaluar técnicamente las mejoras de los sistemas de iluminación, envolvente, heating, ventilation and air conditioning (HVAC) y el uso de energías renovables.

La metodología se implementó en el edificio Parque i del Instituto Tecnológico Metropolitano - ITM - sede Fraternidad, un edificio de tipo institucional. Debido a la complejidad en la división de las diferentes áreas, se decidió tomar dos espacios como elementos representativos y evaluar en ellos las medidas de eficiencia. En cuanto al sistema de iluminación, se evaluaron las medidas de reducción del tiempo de uso de las lámparas (aprovechando la luz natural) y el reemplazo de las luminarias actuales por un sistema Light Emitting Diode (LED). Para la envolvente, se evaluaron tres medidas para reducir la energía requerida para enfriar los edificios: reemplazar las ventanas para reducir la ganancia solar, agregar un sombreado exterior (cortasol) y reducir las infiltraciones en ventanas y puertas. En el sistema HVAC, las medidas evaluadas fueron: ajustar el tiempo de funcionamiento del sistema al horario de ocupación del edificio y ajustar el control de temperatura de los espacios. Igualmente, se evaluó el posible ahorro de energía debido a la implementación de un sistema fotovoltaico conectado en la red e instalado en el techo del edificio.

Las medidas evaluadas podrían generar un ahorro de energía entre 6 y 35 MWh lo que corresponde a 3-17% de la energía consumida por los diferentes sistemas.

Algunas de las medidas no tienen costo alguno por lo que el tiempo de retorno es inmediato. Otras medidas tienen diferentes inversiones lo que genera tiempos de retorno de entre 2,2 y 5,9 años. Igualmente, las medidas producirían una reducción en emisiones de entre 0,6 y 5,6 Toneladas de CO₂ (tCO₂). Una de las medidas arrojó un tiempo de retorno superior al tiempo de vida del proyecto debido a la alta inversión inicial necesaria y a los bajos ahorro logrados con la medida.

Todas las medidas energéticas detalladas en este trabajo constituyen un primer paso para que una organización pueda alcanzar sus objetivos de ahorro y mejora de la eficiencia energética. Pero sin la concientización y la colaboración activa de todos los empleados será muy difícil alcanzar, en la práctica, los objetivos de reducción del consumo de energía y de emisiones de CO₂ fijados. La información, educación y sensibilización de las personas son herramientas de vital importancia para garantizar la correcta operatividad del plan de mejora de la gestión energética de un edificio.

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

Abstract

Reducing energy consumption in new and existing buildings and make them more sustainable is a priority during the projecting. The complex and dynamic interactions between the building and its surroundings need to be modeled and simulated for analysis. The building simulation is one of the key technologies that contribute to the construction of future buildings and the renovation of existing ones, which are more energy efficient, sensitive to health and environmentally friendly. This work presents a methodology to assess the potential for energy savings and make rational and efficient use of energy consumption in tertiary buildings. The methodology developed is based mainly on the use of seven freeware software: tools to technically evaluate improvements in lighting, envelope, heating, ventilation and air conditioning (HVAC), and renewable energy use.

The methodology was implemented in Parque i building at Instituto Tecnológico Metropolitano - ITM - campus Fraternidad, an institutional building. Due to the complexity in the division of the different areas, it was decided to take two spaces as representative elements and evaluate efficiency measures in these spaces. In lighting system, measures to reduce the time of use of the lamps (using natural light) and replacement the existing lamps for high efficiency system (LED) were evaluated. For the envelope, three measures to reduce the energy required to cool the building were evaluated: replace the windows to reduce solar gain, add an external shading (blind), and reduce infiltration in windows and doors. In the HVAC system, the measures evaluated were: set the system operating time to time occupation of the building and adjust the temperature control of spaces. Similarly, the potential energy savings due to the implementation of a grid-connected photovoltaic system installed on the roof of the building was evaluated.

The evaluated measures could generate energy savings between 6 and 35 MWh which corresponds to 3-17% of the energy consumed by the different systems. Some measures have no cost and therefore the equity payback is immediate. Other measures have different initial investment and the equity payback was between 2.2 and 5.9 years. Likewise, the measures produce a reduction in emissions of between 0.6 and 5.6 tCO₂. One measure showed an equity payback higher the lifetime of

the project due to the high initial investment required and low savings achieved with the measure.

All energy measures detailed in this work are a first step for an organization to achieve its objectives of saving and improving energy efficiency. But without the awareness and active involvement of all employees it will be very difficult to achieve in practice the objectives of reducing energy consumption and CO₂ emissions set. Information, education and awareness of the people are vital tools to ensure proper operation of the plan to improve the energy management of a building.

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

Contenido

	Pág.
Lista de figuras	XV
Lista de tablas	XVII
Lista de abreviaturas	XVIII
1. Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Organización del documento	3
2. Marco teórico	5
2.1 Definiciones	6
2.1.1 Sostenibilidad.....	6
2.1.2 Construcción sostenible	6
2.1.3 Edificios y sostenibilidad	6
2.2 Medidas de eficiencia energética.....	7
2.2.1 Reducción de la demanda de calefacción.....	7
2.2.2 Reducción de la demanda de refrigeración.....	7
2.2.3 Reducción de los requerimientos de energía para ventilación	8
2.2.4 Reducir el consumo de energía para la iluminación.....	8
2.2.5 Reducir la energía utilizada para calentar agua	8
2.2.6 Reducir el consumo eléctrico de los equipos de oficina	9
2.2.7 Gestión interna y hábitos de las personas	9
2.3 Simulación energética en edificios.....	9
2.3.1 Diseño asistido por computador y simulación del edificio	10
2.3.2 Aplicación de la simulación de edificios	11
2.3.3 Elección de un programa de simulación	13
2.3.4 Programas disponibles para la simulación de edificios	15
3. Metodología	27
3.1 Identificación y selección de las herramientas	28
3.2 Metodología para el uso eficiente de la energía eléctrica	29
3.2.1 Iluminación	29
3.2.2 Envoltente	33

3.2.3	HVAC	38
3.2.4	Renovables	39
3.2.5	Obtención de costos	42
3.2.6	Evaluación económica	43
3.3	Medidas de eficiencia energética evaluadas	47
3.4	Validación de la metodología	49
4.	Resultados y discusión.....	55
4.1	Iluminación.....	56
4.2	Envolvente	61
4.3	HVAC.....	65
4.4	Renovables.....	69
5.	Conclusiones y trabajo futuro	73
5.1	Conclusiones	73
5.2	Trabajo futuro	77
Bibliografía	79

Lista de figuras

	Pág.
Figura 3.1. Metodología para evaluar el ahorro energético	30
Figura 3.2. Ejemplo de edificio con varios cuartos en DIALux evo.....	31
Figura 3.3. Resultado de isolíneas en DIALux evo.....	31
Figura 3.4. Construcción del componente en WUFI.....	32
Figura 3.5. Visualización de propiedades de material en WUFI	33
Figura 3.6. Selección de datos climáticos en WUFI	33
Figura 3.7. Visualización de resultados en WUFI.....	34
Figura 3.8. Diseño de ventana en WINDOW.....	35
Figura 3.9. Base de datos de vidrios en WINDOW	36
Figura 3.10. Cálculo de propiedades en WINDOW	36
Figura 3.11. Ingreso de información en RETScreen (HVAC).....	37
Figura 3.12. Modelado de edificio en SketchUp	38
Figura 3.13. Ubicación de paneles con Skelion	39
Figura 3.14. Características de la obra con el generador de precios	40
Figura 3.15. Información de la actividad con el generador de precios	41
Figura 3.16. Información meteorológica en RETScreen.....	41
Figura 3.17. Información sobre combustibles y horarios en RETScreen.....	42
Figura 3.18. Análisis financiero en RETScreen	43
Figura 3.19. Información sobre iluminación en RETScreen	44
Figura 3.20. Información sobre fachada en RETScreen	45
Figura 3.21. Información sobre renovables en RETScreen.....	45
Figura 3.22. Vista frontal de Parque i	46
Figura 3.23. Visualización de los Laboratorios A y B	47
Figura 3.24. Infiltraciones en puertas y ventanas	48
Figura 3.25. Flujo de caja acumulado por el cambio	50
Figura 3.26. Modelo implementado en DIALux evo del laboratorio A.....	51
Figura 3.27. Modelo implementado en DIALux evo del laboratorio B.....	53
Figura 4.1. Iluminancia con lámparas actuales en Laboratorio A.....	56
Figura 4.2. Modelo implementado en DIALux evo.....	58
Figura 4.3. Iluminancia con lámparas actuales	59

Figura 4.4. Iluminancia con lámparas tipo LED.....	60
Figura 4.5. Flujo de caja acumulado por el cambio de luminarias.....	60
Figura 4.6. Flujo de caja acumulado por el cambio en el uso	61
Figura 4.7. Flujo de caja acumulado por el cambio de vidrios.....	62
Figura 4.8. Imagen del cortasol Metalbrise de Hunter Douglas.....	63
Figura 4.9. Flujo de caja acumulado por la inclusión del cortasol	63
Figura 4.10. Flujo de caja acumulado por el arreglo de infiltraciones	64
Figura 4.11. Flujo de caja acumulado por el cambio de vidrios.....	65
Figura 4.12. Flujo de caja acumulado por el cambio de horario.....	66
Figura 4.13. Flujo de caja acumulado por la reubicación del termostato	67
Figura 4.14. Flujo de caja acumulado por el cambio de horario y	67
Figura 4.15. Flujo de caja acumulado con todas las medidas excepto	68
Figura 4.16. Flujo de caja acumulado con todas las medidas.....	68
Figura 4.17. Modelo de Parque i creado en Sketchup	70
Figura 4.18. Geolocalización del modelo con Google Maps	70
Figura 4.19. Identificación de áreas sin sombreado.....	71
Figura 4.20. Ubicación de paneles en las áreas disponibles.....	71
Figura 4.21. Flujo de caja acumulado del sistema fotovoltaico	72

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 3.1. Número de herramientas listadas en la página del DOE	28
Tabla 3.2. Área y valor U para los componentes del Laboratorio A	52
Tabla 3.3. Área y valor U para los componentes del Laboratorio B	52
Tabla 4.1. Resumen de los ahorros para cada medida de eficiencia	69

Lista de abreviaturas

ACS	Agua Caliente Sanitaria
AHRI	American Air-conditioning, Heating and Refrigeration Institute
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
BAS	Building Automation Systems
BEE	Bureau of Energy Efficiency
BES	Building Energy Simulation
BEMS	Building Energy Management System
BIPV	Building Integrated Photovoltaics
BMS	Building Management System
BS	Building Simulation
CAD	Computer-Aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
CIE	International Commission of Illumination
COV	Compuestos Orgánicos Volátiles
DEX	Direct Exchange (data communications)
DHW	Domestic Hot Water
DOE	Departamento de Energía de los Estados Unidos
DSF	Double Skin Facade
DSM	Demand Side Management
DSWH	Domestic Solar Water Heating
DT	Design Tools
DWG	Drawing (CAD programs filename extension)
DXF	Drawing Interchange Format
EBE	External Building Envelopes
ECMs	Energy Conservation Measures
EDP	Early Design Phase
EEI	Energy Efficiency Indicators
EPBD	Directive on Energy Performance of Buildings
ERV	Energy Recovery Ventilators
ESP-r	Environmental Systems Performance-Research

GA	Genetic Algorithm
GCWS	Glass curtain wall system
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GIS	Geographic Information System
GSHP	Ground Source Heat Pump
HCI	Human-Computer Interface
HGCHP	Hybrid Ground-Coupled Heat Pump
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning
GHE	Ground Heat Exchanger
HRV	Heat Recovery Ventilation
IECC	International Energy Conservation Code
IEBDP	Integrated Energy-Efficient Building Design Process
IG	Insulating Glass
IGES	Initial Graphics Exchange Specification
IR	Infrared
ISO	International Standards Organization
LBNL	Lawrence Berkeley National Laboratory
LCA	Life Cycle Assessment
LED	Light Emitting Diode
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
MBH	Thousand BTU's per Hour
NFRC	National Fenestration Rating Council
NREL	National Renewable Energy Laboratory
PCM	Phase Change Materials
PSO	Particle Swarm Optimization
RES	Renewable Energy Sources
SCE	Solar Collection Envelope
SH	Space Heating
SHGC	Solar Heat Gain Coefficient
SHWS	Solar Hot Water Systems
STEP	Standard for the Exchange of Product Model Data
SWH	Solar Wall Heating
TCFS	Transparent Composite Facade System
tCO ₂	Toneladas de CO ₂
TEAM	Thermoelectricity Analogy Method
TMY	Typical Meteorological Year
VLT	Visible Light Transmittance
WGBC	World Green Building Council
WPI	Work Plane Illuminance
WWR	Window-To-Wall Ratios

WYEC Weather Year for Energy Calculations
ZEB Zero Energy Building

1. Introducción

1.1 Antecedentes

Debido al aumento en la demanda de energía por parte de los edificios a nivel mundial y al crecimiento de la emisión de los gases de efecto invernadero en la industria de la construcción, hay una conciencia global en que esta actividad se rija por principios de sostenibilidad, ecología y eficiencia energética. Es decir en la reducción del consumo de energía manteniendo los mismos servicios energéticos, sin disminuir el confort y calidad de vida, protegiendo el medio ambiente, asegurando el abastecimiento y fomentando un compromiso sostenible en su uso. Todo esto conlleva a un uso eficiente de los recursos naturales, disminución del consumo energético y uso de energías renovables, disminución de residuos y emisiones, disminución de mantenimiento, explotación y uso de los edificios y su entorno y aumento de la calidad de vida de la sociedad.

Más del 90% de nuestro tiempo permanecemos en los edificios es decir, ya sea en la oficina o en casa. La energía utilizada en los edificios (residenciales y comerciales) representa un porcentaje importante del consumo total de energía de un país. Este porcentaje depende en gran medida del grado de electrificación, el nivel de urbanización, la cantidad de área per cápita, el clima prevaleciente, así como las políticas nacionales y locales de construcción para promover la eficiencia (Abdellatif & Al-Shamma'a, 2015).

El sector de la construcción abarca un conjunto diverso de actividades de uso final, que tienen diferentes implicaciones en el uso de la energía. Los sistemas de calefacción, refrigeración e iluminación del espacio, que en conjunto representan la mayor parte del uso de energía de la construcción en los países industrializados, depende no sólo de la eficiencia energética de estos sistemas sino también en la eficiencia del edificio en donde operan. Los diseños y los materiales usados en la construcción tienen un efecto significativo sobre la energía consumida.

La eficiencia energética significa la utilización de la cantidad mínima de energía para calefacción, refrigeración, iluminación y que se requiere para mantener las

condiciones de confort en un edificio. La cantidad de energía que se consume varía en función del diseño de la estructura del edificio, sus sistemas y de cómo se opera. Mejorar la eficiencia energética en los edificios es una de las formas más constructiva y costo-efectivas para abordar los desafíos del cambio climático. El incremento en las inversiones en eficiencia energética pueden reducir las facturas de energía, reducir la demanda de combustibles fósiles, mejorar la confiabilidad del sistema eléctrico y de gas natural, y ayudar a reducir los contaminantes del aire y los gases de efecto invernadero.

La predicción del potencial de ahorro de energía es esencial para los gestores de la construcción y los ingenieros de servicios al considerar cualquier trabajo de adaptación de un edificio. Un método exacto para predecir el potencial de ahorro de un edificio es una herramienta importante para reducir el riesgo de dirigir recursos importantes a la adaptación de edificios que al final no conlleve a la obtención del ahorro deseado. Es una herramienta estratégica que puede llevar a proyectos de uso eficiente de la energía convirtiéndolo en una zona viable de inversión financiera. Esto podría significativamente promover el sector de servicios de la energía

1.2 Objetivos

En este trabajo se plantea desarrollar una metodología basada en la integración de herramientas computacionales que permita evaluar y hacer un uso racional y eficiente de la energía eléctrica en edificios terciarios.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Identificar y evaluar las diferentes herramientas existentes para el cálculo de la eficiencia energética en edificios.
- Seleccionar las herramientas computacionales y las características técnicas y constructivas del edificio que se tendrán en cuenta en la metodología.
- Desarrollar una metodología basada en las herramientas computacionales seleccionadas para el uso racional y eficiente de la energía eléctrica en edificios terciarios.
- Realizar un análisis costo-efectivo de las medidas o técnicas para el uso racional y eficiente de la energía eléctrica que se establezcan en la metodología.
- Validar la metodología en un edificio terciario considerando los costos asociados a las diferentes medidas para el uso eficiente de la energía eléctrica.

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 de la actividad constructora a nivel mundial, por la utilización de derivados del petróleo en la fabricación y producción de los insumos para esta actividad y posterior utilización de la energía eléctrica en el funcionamiento y operación de los edificios. Se presentan definiciones de conceptos relacionados con esta actividad y del entorno, lo mismo que de las medidas de eficiencia energética. Se detallan aspectos relacionados con la simulación energética de los edificios mediante programas disponibles en las áreas predefinidas en el edificio de estudio: envolvente, HVAC, iluminación y energía renovable.

En el Capítulo 3 se presenta la metodología desarrollada para evaluar el potencial de ahorro energético y hacer uso racional y eficiente del consumo de energía en edificios terciarios. La metodología desarrollada se apoya fundamentalmente en el uso de siete software freeware: herramientas para evaluar técnicamente las mejoras de cada gran sistema descrito anteriormente (DIALux para iluminación, WUFI y WINDOW para envolvente, RETScreen para HVAC y SketchUp + Skelion para renovables) y adicionalmente una herramienta para apoyarse en la obtención de costos (generador de precios) y una herramienta para evaluar la viabilidad económica de las medidas que se pudieran implementar (RETScreen).

En el Capítulo 4 se presentan los resultados y discusión de las medidas de eficiencia energéticas implementadas en el edificio bajo estudio. Las oportunidades para reducir al mínimo las necesidades de energía mediante la eficiencia energética y las energías renovables en los edificios comprendieron cambios en el sistema de iluminación, modificaciones en los materiales de la envolvente, adecuaciones en el uso del sistema de enfriamiento y la integración de un sistema fotovoltaico en el edificio.

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

La población mundial continúa creciendo año tras año a una velocidad que la llevará a duplicarse durante las próximas décadas, lo que supone una disminución del potencial de los recursos naturales y del medio ambiente para las generaciones futuras debido a su exagerada utilización (Xercavins, 1996). Fenómenos de reciente aparición como el cambio climático y la acentuación del deterioro de la capa de ozono, la aparición de la lluvia ácida, la deforestación o la pérdida de biodiversidad, son causadas por las actividades económicas actuales. A pesar que la contaminación se atribuye exclusivamente a la industria y a los sistemas de transporte, especialmente el automóvil, el entorno laboral y residencial donde el hombre pasa más del 90% de su vida, es en gran medida culpable de dicha contaminación. Los edificios consumen entre el 20 y el 50% de los recursos físicos (Friess, Rakhshan, Hendawi, & Tajerzadeh, 2012) según su entorno, lo que causa en parte el actual deterioro del medio ambiente.

En las actividades industriales ejecutadas por el hombre, la actividad constructora es la mayor consumidora de recursos naturales como la madera, minerales, agua y energía. En tanto, los edificios, una vez construidos continúan siendo una causa directa de contaminación, por las emisiones que se producen en los mismos o el impacto sobre el territorio, y por el consumo de energía y agua necesarias para su funcionamiento.

La aplicación de los criterios de sostenibilidad (Lotfabadi, 2014) llevará hacia una conservación de los recursos naturales, una maximización en la reutilización de estos, una gestión del ciclo de vida, y consecuentemente reducciones de la energía utilizada. Múltiples son las actuaciones políticas que sobre este tema se han llevado a cabo. Por lo tanto, debe evaluarse la regeneración urbana y, por ende, favorecer la reutilización de viviendas existentes y con ello mejorar su eficiencia energética y medioambiental, considerando la vivienda no como un elemento aislado, sino intrínsecamente inseparable de su entorno e interrelacionada con la política de suelo en el marco de la construcción de la ciudad (Güçyeter & Günaydin, 2012).

2.1 Definiciones

A continuación se presentan algunas definiciones relacionadas con el mejoramiento energético en edificios.

2.1.1 Sostenibilidad

La sostenibilidad consiste en la adaptación del entorno (Abdellatif & Al-Shamma'a, 2015; Todorovic & Kim, 2014) de los seres humanos a un factor limitante: la capacidad del entorno de asumir la presión humana de manera que sus recursos naturales no se degraden irreversiblemente (Cáceres, 1996).

2.1.2 Construcción sostenible

La construcción sostenible la cual debería ser la construcción del futuro, se puede definir como aquella que con especial respeto y compromiso con el medio ambiente, implica el uso sostenible de la energía (Mikučionienė, Martinaitis, & Keras, 2014). Cabe destacar la importancia del estudio de la aplicación de las energías renovables en la construcción de los edificios, así como una especial atención al impacto ambiental que ocasiona la aplicación de determinados materiales de construcción y la minimización del consumo de energía que implica la utilización de los edificios (Casado, 1996).

2.1.3 Edificios y sostenibilidad

El objetivo principal de los edificios ha sido la de proteger a sus ocupantes de los elementos naturales (Bellia, d'Ambrosio Alfano, Giordano, Ianniello, & Riccio, 2015; Moschetti, Mazzarella, & Nord, 2015). Los principales esfuerzos se han enfocado a la mejora de los aspectos necesarios para llevar a cabo este objetivo, es decir, una mejora en la calidad global del edificio y en el control de los costos correspondientes. Actualmente la noción de desarrollo sostenible introduce una restricción adicional, que es la de cumplir el objetivo principal de los edificios sin comprometer la posibilidad de las generaciones futuras de satisfacer sus necesidades (Asdrubali, Baldinelli, Bianchi, & Sambuco, 2015; Bourdeau, 1996). Los edificios, a lo largo de su construcción, uso y demolición ocasionan una gran cantidad de impactos ambientales que nacen de la actividad económica. Éstos ocasionan un gran impacto en el ambiente global a través de la energía utilizada para proveer a los edificios de los servicios necesarios y de la energía contenida en los materiales utilizados en la construcción. Los edificios son responsables de aproximadamente el 50% de energía utilizada y de las emisiones de CO₂ a la atmósfera (Agha-Hosseini, El-Jouzi, Elmualim, Ellis, & Williams, 2013).

2.2 Medidas de eficiencia energética

Reducir el consumo energético de los nuevos edificios y de los existentes y hacerlos más sostenibles es una prioridad en el momento de proyectarlos. En este sentido, aquí se presentan algunos de los conceptos que hay que tener en consideración en el proceso de concepción del equipamiento y los nuevos apartados que se habrán de incluir en el proyecto de todo edificio nuevo y en el uso de los existentes. La correcta aplicación de estos conceptos permite reducir el consumo y disponer de un edificio más sostenible. El objetivo es hacer que se consideren dentro del proyecto aquellos aspectos que influirán en el consumo de energía del edificio. Así se dispondrá de un nuevo elemento, la eficiencia energética, para decidir entre un proyecto u otro (Perlova, Platonova, Gorshkov, & Rakova, 2015).

También hay que enfatizar que la ubicación de los edificios y equipamientos públicos puede condicionar un consumo extra de energía. Los desplazamientos para llegar, ya sean en transporte público o privado, obligan a consumir energía. Así, hay que tener muy en cuenta la ubicación del futuro equipamiento en relación a los medios de transporte público antes de iniciar el proyecto ya que tendrá una repercusión muy importante en el consumo energético posterior. Reducir el consumo en los edificios existentes siempre ha de ser la primera tarea a plantear. Antes de estudiar la aplicación de energías renovables (solar, biomasa, eólica, etc.), se debe pensar en la aplicación de otras medidas destinadas a la reducción del consumo energético (soluciones arquitectónicas, tecnologías eficientes de energía, minimización de residuos) (Abd Rashid & Yusoff, 2015). A continuación, se presentan algunos enfoques a través de los cuales el consumo de energía de un edificio se puede reducir, manteniendo o mejorando el nivel de confort en el edificio.

2.2.1 Reducción de la demanda de calefacción

La demanda de calefacción se puede reducir limitando la superficie expuesta del edificio, mejorando el aislamiento de la estructura del edificio, reduciendo las pérdidas por ventilación, y mediante la selección de sistemas eficientes de calefacción con controles eficaces (Yu, Tian, Xu, & Wang, 2015).

2.2.2 Reducción de la demanda de refrigeración

El consumo de energía en edificios típicos de oficina con aire acondicionado es aproximadamente el doble de los edificios de oficinas con ventilación natural. La necesidad de aire acondicionado o el tamaño de los sistemas instalados, se pueden reducir mediante el control de ganancia solar (De Lieto Vollaro et al., 2015) a través

de las ventanas de cristal, la reducción de las ganancias de calor interno, haciendo uso de la masa térmica y ventilación nocturna para reducir las temperaturas máximas, proporcionando ventilación natural eficaz, y reduciendo las cargas de iluminación y con la instalación de controles eficaces de iluminación (Pedrini, Westphal, & Lamberts, 2002).

2.2.3 Reducción de los requerimientos de energía para la ventilación

Cuando la demanda de refrigeración es reducida mediante la aplicación de las medidas anteriores, es posible reducir las ganancias de calor para que el aire acondicionado no sea necesario, y las condiciones de confort se pueden mantener mediante el uso de ventilación natural. La energía necesaria para la ventilación se puede minimizar, mediante el diseño del edificio que maximiza la ventilación natural, diseño de la ventana efectiva, uso de la ventilación en modo mixto, y el uso eficiente de los sistemas de ventilación mecánica.

2.2.4 Reducir el consumo de energía para la iluminación

Esto se logra a través del aprovechamiento al máximo de la luz natural y evitar un aumento excesivo del calor solar, utilizando iluminación en las tareas para evitar el exceso de niveles de luminancia de fondo, instalación de luminarias eficientes con una salida de luz de alta eficiencia respecto al consumo de la energía (Das, Pal, & Pradip, 2015), selección de lámparas con una alta eficacia luminosa, y proporcionar un control efectivo que evitar que las luces se dejen innecesariamente encendidas.

2.2.5 Reducir la energía utilizada para calentar agua

Esto se puede lograr mediante instalación de controles de tiempo, y programarlos correctamente la hora de las necesidades de agua caliente, establecer termostatos de agua sanitaria caliente para la temperatura adecuada, no más de 60°C para usos normales, (Rankin & Rousseau, 2006) desconexión de los elementos de calefacción eléctrica (inmersión), si la caldera está disponible, apagar las bombas de cualquier usuario cuando el agua caliente no sea necesaria, sustitución de los daños en el aislamiento o la falta de todos ellos en las tuberías de agua caliente y los cilindros, excepto cuando las tuberías están proporcionando calor útil en el espacio, e identificación de un sistema adecuado de agua caliente. La reducción más significativa en el uso de energía para agua caliente se puede lograr gracias a un calentamiento por energía solar.

2.2.6 Reducir el consumo eléctrico de los equipos de oficina y electrodomésticos

La mayoría de empresas cuentan con una amplia gama de equipos de oficina para funcionar. Los elementos básicos esenciales, computadores, monitores, impresoras, máquinas de fax y fotocopiadoras, proyectores, escáneres y servicios de teleconferencias, se han convertido en parte integral de la actividad diaria. El equipo de oficina es el usuario de energía de mayor crecimiento en el mundo de los negocios, con un consumo del 15% de la electricidad total utilizada en las oficinas. Se espera que aumente a 30% en 2020, requiriendo aumentar los requisitos de refrigeración para compensar el calor adicional que producen estos equipos (Stroupe, 2010). Como la ventilación y aire acondicionado son grandes consumidores de energía por sí mismos, es necesario asegurar que sólo se usen cuando sea absolutamente necesario.

Medidas típicas para reducir el consumo de los aparatos electrónicos son apagar los aparatos lo que permite reducir el consumo de energía y el calor producido por los equipos, que a su vez reduce los costos de enfriamiento; actualización de los equipos existentes, algunos equipos de alta eficiencia energética pueden costar más, pero se recupera la inversión durante la vida útil de los equipos; adquirir equipos para las tareas específicas o necesidades actuales; adquirir equipos con sistema de etiquetado energético.

2.2.7 Gestión interna y hábitos de las personas

El nivel de ahorro energético alcanzable en los equipo de oficina, se debe a la gestión diaria por parte del personal. Un programa de conservación de energía simple para una organización debería considerar el establecimiento de una política energética para la organización, nombrar un defensor de la energía, la participación del personal, el establecimiento de objetivos, uso de avisos y recordatorios, la realización de rondas a pie, y tomar lecturas de los contadores (Gugliermetti, Passerini, & Bisegna, 2004).

2.3 Simulación energética en edificios

Las necesidades energéticas de un edificio no sólo dependen de la actuación individual de los componentes de la envolvente (paredes, ventanas y techos) y los sistemas de HVAC e iluminación, sino también en su rendimiento global como un sistema integrado en el edificio. Para un edificio comercial en gran escala, las interacciones complejas y dinámicas que tiene el edificio con su entorno necesitan ser modeladas y simuladas para el análisis. La técnica a disposición de arquitectos,

ingenieros y administradores de inmuebles concerniente con la conservación de energía es la simulación del edificio (Shaw, 1996). Antes de la llegada de la simulación del edificio asistida por computador, los arquitectos e ingenieros de servicios del edificio se basaron en gran medida en los cálculos manuales de las condiciones de diseño pre-seleccionadas y recurrieron a menudo a extrapolaciones que se extendieron más allá de los conceptos de diseño convencionales.

Por otra parte, a través de análisis paramétricos, los profesionales pueden ampliar sus conceptos de diseño para incorporar nuevas tecnologías e innovaciones, creando así oportunidades para un mayor ahorro energético. En reconocimiento de la importancia del uso de energía en los edificios, la Agencia Internacional de Energía (AIE) ha financiado un amplio rango de actividades de investigación y desarrollo en el sector de la construcción. Dentro de esas actividades, se ha determinado que la simulación de edificios es una de las tecnologías clave que contribuyen a la construcción de los futuros edificios, los cuales son más eficientes energéticamente y respetuosos del medio ambiente (Anderson, Wulfhorst, & Lang, 2015).

2.3.1 Diseño asistido por computador y simulación del edificio

La aplicación de las herramientas de simulación en el diseño del edificio se puede dividir en dos grupos: documentación y diseño asistido por computador, y simulación por computador. Hoy en día, la primera aplicación, que a menudo utiliza computadores personales para producir documentos técnicos y dibujos, ya es popular entre los diseñadores de edificios. La otra, a menudo requiere el uso de herramientas de ingeniería para calcular ganancias de calor de la fachada y cargas espaciales de calor, predecir el rendimiento energético del edificio, y proporcionar diagnósticos para permitir el control automático del sistema y la operación de las plantas. Mientras que la primera aplicación puede ayudar a mejorar la productividad de los diseñadores de edificios, tiene poco impacto en las características de eficiencia del edificio. Sólo la simulación asistida por computador es la clave para mejorar la eficiencia energética de los edificios. La simulación de edificios se inició en los años 60 y se convirtió en el tema candente de los años 70 dentro de la comunidad de investigación de la energía.

Durante estas dos décadas, la mayor parte de las actividades de investigación se dedicaron a los estudios de la teoría fundamental y los algoritmos de estimación de la carga y la energía. Los estudios habían dado lugar a muchos refinamientos de la técnica de función de transferencia pionera por Mitalas y Stephenson (Mitalas & Stephenson, 1967), y el bien conocido método simplificado como el método de grado-día, equivalente al método completo de carga horaria, y el método de

recipiente, para predecir el consumo de la energía en los edificios según la American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE, 1967). Durante este período, la simulación del edificio fue considerado como la clave para convertir edificios de alto consumo de energía en entornos térmicamente favorables.

El paso de la crisis del petróleo hizo disminuir el incentivo para el logro de la eficiencia energética. Así como la atención en la conservación de energía comenzó a decaer en los años setenta y principios de los ochenta, la simulación de los edificios comenzó a recibir un renovado interés provocado en gran parte por los avances en los computadores personales. Durante este mismo período, el Departamento de Energía de Estados Unidos asignó más de US \$ 1 billón para proyectos en la conservación de la energía y las energías renovables (Marszal et al., 2011). El resultado de este patrocinio es una serie de programas de simulación de sistemas energéticos como los programas de simulación DOE-2 (U.S. Department of Commerce, 1980), ESP (Clarke & McLean, 1986) y TRNSYS (Klein, 1983). Sin embargo, estas herramientas se mantuvieron en general en los laboratorios de investigación y rara vez se emplearon en la práctica del diseño de edificios, por el nivel de dificultad y el alto costo que interviene en su uso.

La situación ha cambiado desde entonces. El inicio de los años 90 vio la creciente preocupación mundial para proteger el medio ambiente. El consumo excesivo de combustibles fósiles y el uso de refrigerantes dañinos basados en fluorocarbonos fueron culpados por el calentamiento global y el adelgazamiento de la capa de ozono. En el sector de la construcción, el reto para los profesionales fue crear un entorno de construcción sano y confortable, con menor consumo de energía y la reducción del impacto negativo sobre el medio ambiente. La demanda de “edificios verdes” (Hernandez & Kenny, 2010; Jim, 2014; Zhang, 2015) ha hecho la aplicación de simulación del edificio una necesidad. Por lo tanto, estas herramientas han ganado la aceptación como análisis de rutina y una herramienta de diseño.

2.3.2 Aplicación de la simulación de edificios

El uso de la simulación por computador por profesionales de la construcción se considera ahora común. La simulación del edificio se puede aplicar en el análisis del ciclo de vida de un edificio, incluyendo el diseño, construcción, operación, mantenimiento y gestión. Hay varias aplicaciones populares.

- **Calculo de la carga de calefacción / refrigeración del edificio**

Los valores pico y perfiles de carga de calefacción / refrigeración del edificio, son la base para el dimensionamiento y la selección de equipos de aire acondicionado, sistemas y plantas.

- **Análisis del rendimiento de la energía para el diseño y la modernización**

Se puede realizar un diseño de edificio energéticamente eficiente mediante el análisis del perfil de la demanda anual de energía del edificio y la demanda de la carga parcial de los equipos importantes en el consumo de energía, y el presupuesto de energía del edificio se puede estimar con precisión en la gestión de planificación energética. Además, las estrategias innovadoras para el ahorro de energía tales como el techo reflectante, luz natural, calentamiento solar de agua, recuperación de calor y almacenamiento térmico pueden ser evaluados antes de su ejecución (Xiao & Wang, 2009).

- **Diseño de Gestión y Control energético en los edificios (EMCS, por sus siglas en inglés)**

Desempeña el papel de seguimiento, control y notificación de la operación de los sistemas de construcción y plantas a fin de asegurar el confort térmico y la eficiencia energética. EMCS puede incluir estrategias como el control de entalpía, reducción nocturna y un control óptimo de arranque / parada y puede ayudar a explotar todo el potencial de ahorro de energía de un buen diseño del edificio. EMCS se ha concentrado en proporcionar directrices para la selección de sistemas adecuados, desarrollo y reglas de administración y evaluación de los métodos de emulación.

- **Cumplimiento con las normas de construcción, códigos y normas**

La simulación de una construcción se puede emplear para diseñar el edificio acorde con las exigencias de la normativa local, códigos o normas. Posteriormente, la simulación de la construcción puede complementar las auditorías energéticas para comprobar la eficiencia energética del edificio construido.

- **Análisis de costos**

Algunas herramientas son capaces de realizar un análisis de costos de las diversas opciones que se simulan, por lo tanto presentan al diseñador alternativas de costos efectivos de ahorro de energía (Kamaruzzaman, Edwards, Zawawi, & Che-Ani, 2015). Estas herramientas son las más utilizadas junto con los códigos de conducta y normas de eficiencia energética.

- **Opciones de ahorro pasivo de energía**

Las herramientas de simulación pueden ser utilizadas para investigar la viabilidad técnica y económica de las opciones de diseño pasivo, como protección solar, iluminación natural, evaporación y refrigeración de la tierra, ventilación nocturna, el enfriamiento radiativo, el aislamiento móvil, techo estanque, techo reflectante, y distintos almacenamientos de calor, liberación y sistemas de amortiguación.

2.3.3 Elección de un programa de simulación

El software informático es un producto complejo, más para aquellos en el campo de la simulación del edificio. Es un hecho común hoy en día que para cualquier problema, por lo general hay más de una herramienta que puede cumplir con los requisitos. Por otro lado, no existe una sola herramienta que puede realizar todo tipo de simulación del edificio. El usuario potencial se enfrenta con la dificultad de elegir un programa adecuado de los disponibles. ¿Qué herramienta debe seleccionarse? La respuesta a esta pregunta, por desgracia, no es sencilla. La elección debe hacerse después de una cuidadosa evaluación de las necesidades del usuario y la congruencia con las capacidades de las herramientas.

Hay tres factores vitales a tener en cuenta desde el lado del usuario. El primero se refiere a las necesidades o propósitos. La comprensión de la naturaleza del problema que el usuario espera resolver con el uso de una herramienta es un criterio importante. La segunda se refiere al presupuesto. El presupuesto para comprar y usar una herramienta incluye el costo del software, el mantenimiento, si es necesario, y el costo de la plataforma informática para ejecutarla. Además, es conveniente prever la capacitación de los usuarios. La tercera es la disponibilidad de las instalaciones. El usuario debe seleccionar una herramienta que se pueda ejecutar en equipos informáticos existentes, o cuando la inversión prevista en un nuevo computador es soportable.

Es difícil comparar las herramientas en forma absoluta, ya que cada una tiene sus ventajas y desventajas. En términos generales, las herramientas pueden ser evaluadas en el precio y el rendimiento. El software informático es un producto especial, y su costo incluye no sólo el coste de adquisición, sino también el costo de uso. Los componentes de los costos incluyen: (i) costo del programa, que cubre la cuota de licencia, servicio post-venta, y la tasa de actualización de software, (ii) costo de capacitación, que es la cuota que los proveedores de software cobran para capacitar al usuario que utiliza el software, y (iii) costo de uso, que incluye los recursos consumidos de mano de obra y el equipo durante el uso.

Hoy en día más y más herramientas se pueden ejecutar en un computador, por lo que el costo de uso de las instalaciones del computador es relativamente pequeño. Pero el trabajo puede ser bastante caro, especialmente cuando se requiere un usuario preparando los datos de entrada y a la espera de los resultados de la simulación. Con la creciente complejidad de las herramientas, el costo del entrenamiento puede aumentar. Sin embargo, el costo de uso es a menudo más alto, seguido por el del entrenamiento y el costo del software. El rendimiento de una herramienta depende de qué tan bien se domine el conocimiento, el software de ingeniería, garantía de calidad del software (Bhaskoro, Gilani, & Aris, 2013; Ye, Long, Zhang, & Zou, 2014), y la tecnología de la Interfaz Hombre-Computador (HCI, por su sigla en inglés), aplicada durante el desarrollo. Una herramienta debe estar bien probada y validada antes de ser lanzada comercialmente. El desempeño de una herramienta puede ser evaluada en varios aspectos, como se indica a continuación.

- Capacidad de cómputo

La capacidad de cómputo es un aspecto importante y puede ser descrita por atributos tales como: (i) algoritmo principal, (ii) el ámbito de aplicación, (iii) velocidad y precisión de computación, y (iv) la extensibilidad del usuario. Para un programa de simulación de energía del edificio, el algoritmo de cálculo de la carga puede ser detallado o simplificado. El cálculo puede estar basado en una sola zona o multizona. Otras características importantes de un algoritmo deben incluir el tratamiento de diferentes tipos de condiciones de frontera (especialmente para la zona de adyacencia y las zonas no acondicionadas), las condiciones iniciales y el plan de mallado (para el método de espacio de estado o el método de diferencias finitas).

- Usabilidad

Aunque muchas herramientas han sido desarrolladas, su uso en la práctica de la construcción está todavía muy limitado debido a su usabilidad (Olivia & Aidan, 2015). La usabilidad de una herramienta puede ser evaluada por las siguientes etapas de su uso: (i) aprender a usar, (ii) preparación de los datos de entrada, (iii) la ejecución del programa, y (iv) la interpretación de los resultados. Idealmente, una herramienta debe ser fácil de aprender y fácil de usar, y debe ir acompañada de un manual de usuario bien escrito. Una herramienta debería incluir demostración y validación, ejemplos convenientes, servicios en línea de ayuda, incluida la ayuda sensible al contexto, un contacto de servicio post venta y soporte de Internet. Datos introducidos de forma incorrecta no producen a menudo un error de programa, sino más bien dan lugar a respuestas erróneas que en muchos casos no son fácilmente

distinguibles de las correctas. Por lo tanto, los datos de entrada deben mantenerse a un mínimo, y ser ordenados en un formato compatible con poca redundancia.

- **Capacidad de intercambio de datos**

La preparación de los datos de entrada puede ser tediosa, lenta y propensa a errores. Algunas herramientas son a veces difíciles de utilizar, ya que no pueden comunicarse con otros programas o sistemas que pueden proporcionar datos de entrada a la misma. Las herramientas deben tener el mecanismo para importar datos desde y exportar los datos a bases de datos externas. Creación de datos, especialmente la geometría y los datos de la topología, se crean a menudo dentro de un sistema Computer-Aided Design (CAD) y existen en los archivos físicos en formato ASCII, DXF, IGES, o formato STEP. Si una herramienta puede leer datos de estos archivos, no sólo ahorrará tiempo al usuario, sino también reducirá los errores de digitación de datos. Las herramientas también deben tener la capacidad de exportar los resultados a archivos de texto ASCII o bases de datos de los que pueden ser procesados por la hoja de cálculo o programas de computación gráfica.

- **Bases de datos de apoyo**

Las herramientas sencillas de diseño requieren la entrada de datos limitada y no puede utilizar cualquier base de datos. Pero los programas detallados de simulación a menudo necesitan los datos de entrada de materiales de construcción y estructuras, componentes de HVAC, y los datos meteorológicos por hora. Estos datos, en gran medida, pueden ser normalizados y se almacenan en bases de datos seleccionadas. Por lo tanto, las herramientas deben tener una capacidad de gestión de base de datos.

2.3.4 Programas disponibles para la simulación de edificios

Los programas de simulación de edificios pueden agruparse en dos categorías: herramientas de diseño (DT, por su sigla en inglés) y los programas detallados de simulación (DSP, por su sigla en inglés). Las DT son más de propósito específico y se utilizan a menudo en las primeras fases de diseño, ya que requieren menos datos de entrada. Por ejemplo, las DT son muy útiles en la verificación del cumplimiento de las normas preceptivas de construcción. Debido a que las DT son fáciles de desarrollar y probar, han proliferado. Muchas de ellas se han desarrollado para uso interno, mientras que algunas se pueden encontrar en el dominio público. Por otro lado, los DSP a menudo incorporan técnicas computacionales tales como diferencias finitas, elementos finitos, y la función de transferencia para el cálculo de la carga y la energía del edificio.

Para tener en cuenta las interacciones dinámicas entre todos los elementos térmicos asociados con el confort y el consumo de energía, incluyendo la fachada del edificio, los sistemas HVAC, la iluminación y los dispositivos de control, los DSP a menudo tienen que realizar cálculos hora a hora (a veces incluso minuto a minuto). Así, se pueden lograr el diseño óptimo y el funcionamiento de un edificio y sus instalaciones. Además del diseño, los DSP también son útiles en la verificación del cumplimiento de los resultados basados en los estándares de energía en los edificios. A continuación, se detallan los principales sistemas que afectan el consumo de energía eléctrica en los edificios y se indican algunas herramientas disponibles para simular su evaluación.

- Agua caliente sanitaria (ACS)

En muchos edificios, como hoteles, apartamentos, hospitales, etc., el agua caliente sanitaria se proporciona a los usuarios mediante el uso del calentador de agua, integrado a una caldera de calefacción central del edificio (Boait, Dixon, Fan, & Stafford, 2012). La tecnología de la energía de calefacción solar está bien establecida. Para aplicaciones prácticas, sin embargo, hay una necesidad de estudios comparativos de las diferentes marcas y modelos de colectores solares disponibles en el mercado (Heier, Bales, & Martin, 2015), para ayudar a los potenciales instaladores y usuarios finales en la evaluación del mejor dispositivo que se adapte a sus necesidades, en una ubicación específica (Hernandez & Kenny, 2012). En las últimas décadas, sofisticados programas de simulación han sido desarrollados para realizar estos cálculos complejos, por ejemplo TRNSYS, T-SOL, Polysun o Smile (Domínguez-Muñoz, Cejudo-López, Carrillo-Andrés, & Ruivo, 2012).

En relación con los programas de computación para realizar los cálculos necesarios para el diseño de la instalación, ISOFOTON tiene gran relevancia. Este programa fue creado por uno de los más importantes fabricantes de paneles fotovoltaicos y colectores de energía solar térmica en la Unión Europea, y utiliza algoritmos del programa F-CHART. ISOFOTON permite cálculos para varios tipos de instalaciones solares (incluyendo calefacción y suelo radiante) y, a pesar de que no se basa en un proceso de simulación dinámica, da resultados satisfactorios. Otro programa de computación es Censolar, que incluye una amplia base de datos de radiación solar (Almeida & Oliveira, 2008).

A escala mundial, existen varios programas de rigor excepcional que son utilizados por la mayoría de investigadores y profesionales del sector. Uno de ellos es el F-CHART, un programa informático para el análisis y diseño de sistemas de calefacción solar activa y pasiva. Desarrollado en el laboratorio de energía solar de

la Universidad de Wisconsin, su algoritmo fundamental se basa en obtener el factor de energía solar, relación entre la potencia instantánea solar y el requerimiento de calor de la carga, donde este último es la suma de la energía solar y las fuentes auxiliares en cada instante.

Por último, existen otros programas y métodos usados con menor frecuencia a nivel internacional que evalúan el rendimiento de los colectores fijos o de seguidores del sol. Todos estos procedimientos de determinación de las necesidades de calentamiento con energía solar de un edificio, tienen los inconvenientes de complejidad de uso, y la dificultad en la obtención de los datos de entrada. Esto hace su uso impráctico para los constructores, usuarios e instaladores que por lo general no tienen un amplio conocimiento del funcionamiento de las instalaciones solares (Everts & Swan, 2013).

Los programas que simulan el funcionamiento de una instalación convencional de calefacción, conectada a un sistema de calentamiento solar, están bien aceptados. Se utilizan cada vez más en centros de investigación, universidades, departamentos de I+D industrial, etc., para determinar el comportamiento energético de un edificio con un sistema de calefacción mixto (convencional y solar). Ejemplos son ESP, DOE-2, BLAST, CODYRUN, y TRNSYS. Con respecto a TRNSYS (sistema de simulación transitoria), es un programa de simulación dinámico de sistemas energéticos, de reconocido prestigio a nivel mundial para la simulación de sistemas solares térmicos en los campos de la investigación, la docencia y la ingeniería aplicada. Como todas las simulaciones dinámicas, es un programa muy complejo, ya que tiene en cuenta la influencia recíproca de la radiación solar, la temperatura y el consumo en la operación del sistema. (Cuadros, López-Rodríguez, Segador, & Marcos, 2007).

Con aplicación de DOE-2 versión 2.1E, se llevó a cabo una investigación en la producción de ACS en grandes edificios. Se estudiaron tres tipos de edificios: una oficina, una residencia y un hotel de tres estrellas en Senegal, en cuatro regiones climáticas (Ndoye & Sarr, 2008). Por lo tanto, el objetivo principal del estudio fue determinar los valores mensuales y anuales de las funciones específicas de energía ACS (carga térmica de ACS, consumo de electricidad para satisfacer la carga, carga pico de ACS, consumo de electricidad pico para ACS) a condiciones estándar. De las simulaciones DOE2.1E, el consumo de energía calculado para ACS se comparó con las mediciones en un edificio de hotel de 3 estrellas, demostrando buena concordancia. Siguiendo esta validación, se ha utilizado el programa informático DOE2.1E para estudiar el consumo de agua caliente sanitaria energético en las condiciones estándar. Si bien la región climática no tiene

influencia significativa, los resultados obtenidos muestran cómo la carga de energía de ACS es significativa cuando se compara con la carga total de energía del edificio, especialmente para los edificios residenciales y el hotel 3 estrellas.

Otra aplicación del calentamiento de agua sanitaria se realizó en Hong Kong, un sistema híbrido de bomba de calor con temperatura del suelo (HGCHP) se llevó a cabo mediante un modelo de simulación con ayuda de HVACSIM+, para enfriar/calentar espacios y a la vez suministrar agua caliente doméstica. Una manera económica y práctica de reducir el alto costo de capital del sistema de HGCHP es precalentar una porción de ACS mediante el calor de condensación en exceso a través de la instalación de un atemperador para la unidad de la bomba de calor. En realidad, hay un gran número de factores que afectan al rendimiento HGCHP, tales como la capacidad de la bomba de calor, diferentes perfiles de uso de agua caliente sanitaria, las condiciones ambientales que cambian continuamente, las cargas del edificio y el tiempo de escala de tiempo de transferencia de calor de la superficie (GHE). Por lo tanto, es necesario utilizar un modelo de simulación por hora, para analizar el rendimiento de la operación de este sistema híbrido, para un edificio determinado bajo condiciones climáticas dadas (Cui, Yang, Spitler, & Fang, 2008).

- Fachada o envolvente

La fachada o envolvente de un edificio es lo que separa a los ambientes interiores y exteriores de un edificio (Sadineni, Madala, & Boehm, 2011), es decir los cuatro paramentos que encierran un edificio. Igualmente, algunos autores definen el techo como la quinta fachada, importante para la implementación de energías alternativas, como la fotovoltaica que ayuda a mitigar el uso de otra fuente de energía no alternativa.

La composición de estos elementos: estructura (geometría), ventanas (Hee et al., 2015) y sus aberturas o fenestraciones (diseño, construcción, o la presencia de ventanas y puertas en un edificio), orientación respecto a la radiación solar, y el impacto de los vecinos (paisaje circundante, sombreado, etc.) tienen incidencia en la iluminación natural o artificial y el confort de los ocupantes al interior de los edificios; así como el manejo de los equipos de acondicionamiento de aire: enfriamiento, calefacción y ventilación (Chedwal, Mathur, Agarwal, & Dhaka, 2015). Todo lo anterior repercute en el manejo óptimo de la energía que utilicen los equipos para lograr las condiciones adecuadas de trabajo (Kim, 2011).

Una de las herramientas computacionales empleadas para lograr la simulación del sombreado exterior y cálculos internos de irradiación de haz de luz y radiación

difusa es TRNSHD y su interfaz gráfica TRNSCAD, es una herramienta independiente que no se restringe tanto a edificios y por lo tanto se puede utilizar para resolver otros problemas de sombreado, puede manejar una gran variedad de formas de superficie (Hiller, Beckman, & Mitchell, 2000).

La arquitectura solar pasiva (Chandel & Sarkar, 2015; Ralegaonkar & Gupta, 2010) abarca una amplia gama de estrategias y opciones resultantes en el diseño de edificios energéticamente eficientes y una mayor comodidad de los ocupantes, para este efecto se emplea una protección específica para lograr una energía eficiente en las ventanas, como es la sombrilla estática, diseñada mediante el cálculo de los ángulos del sol para el verano y el invierno y la orientación de la pared. Por lo tanto, su uso puede reducir la calefacción, refrigeración y cargas de iluminación, contribuyendo así a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, esta tecnología ofrece una dinámica potencial a la fachada de un edificio, lo que añade importantes ventajas a su estilo arquitectónico y estético (Syrrakou, Papaefthimiou, & Yianoulis, 2006). El software RESFEN y SIMAPRO 3.1 se utilizan para adelantar simulaciones y cálculo de mejoramiento de la energía con las técnicas mencionadas.

Otro aspecto a considerar es el daño causado como resultado directo o indirecto de transferencia de humedad en la fachada del edificio (Stazi, Bonfigli, Tomassoni, Di Perna, & Munafò, 2015). En general, la humedad provoca: a) daño a las paredes exteriores, b) alto consumo de energía de calefacción o de refrigeración, c) ambiente interior incómodo. Hay una serie de herramientas de simulación destinadas a predecir a largo plazo el rendimiento higrotérmico de la envolvente de los edificios. El WUFI-StOpStar y su familia de predecesores WUFI y WUFI-ORNL/IBP son herramientas computacionales que ayudan en su tratamiento. El LETENITE-VTT es una versión mejorada del modelo original LATENITE. MOIST es un programa de PC para predecir la transferencia unidimensional del calor y humedad en la fachada de edificios (Karoglou, Moropoulou, Krokida, & Maroulis, 2007).

El UMIDUS es un programa de computador para la predicción de la transferencia de calor y humedad en los elementos de construcción porosos; el modelo predice la humedad y un perfil de temperatura dentro de las paredes de múltiples capas y un techo de poca pendiente para cualquier paso de tiempo y calcula la transferencia de calor y masa. El Delphin4 es un modelo dimensional para el transporte de calor, aire, humedad y sal en los materiales porosos. EMPTIED es un modelo unidimensional de transporte de calor y humedad, con algunas consideraciones incluidas de fugas de aire (Brinks, Kornadt, & Oly, 2015). GLASTA es un modelo

unidimensional para transporte de calor y humedad. MATCH es un modelo unidimensional que representa el transporte de humedad por difusión y succión de líquido. 1D-HAM es un modelo unidimensional para transporte combinado de calor, aire y humedad en una pared porosa multicapa (Karoglou et al., 2007).

La transferencia de calor a través de la envolvente del edificio es la componente principal de las cargas térmicas y, por lo tanto, en la determinación de las necesidades de energía. Las características termodinámicas de los elementos másicos de edificios (por ejemplo, hormigón o paredes de ladrillo) requieren un análisis transitorio del flujo de calor a través de la envolvente del edificio. Muchos modelos de simulación con el método del factor de respuesta o función de transferencia de conducción, tales como EnergyPlus y DOE-2, se han desarrollado y utilizado con éxito. Por ejemplo, en el diseño de edificios, especialmente en la etapa de diseño preliminar, los arquitectos necesitan principalmente los parámetros físicos de resistencias térmicas, las tasas de descomposición y retardos de la envolvente multicapa para pronosticar el consumo de energía del edificio y el confort térmico (Ochoa & Capeluto, 2009). En los bien conocidos sistemas de simulación de energía para HVAC, LOADS el programa simulador de DOE-2 calcula las ganancias y las pérdidas de calor por conducción a través del edificio utilizando los factores de respuesta. BLAST utiliza ambos métodos para un análisis cuidadoso y completo de la conducción térmica transitoria a través de las paredes. HVACSIM+, TRNSYS, IBLAST y EnergyPlus, adoptan funciones de transferencia para evaluar los beneficios y las pérdidas de calor a través del edificio (Peng & Wu, 2008).

El revestimiento de los edificios se lleva a cabo mediante: muros Trombe, muros ventilados o muros acristalados. Desempeño de diferentes tecnologías de fenestración incluidas aerogel (Ihara, Gao, Grynning, Jelle, & Gustavsen, 2015), acristalamiento y marcos en vacío también cumplen esta función. Un adecuado diseño arquitectónico de la fachada del edificio puede reducir significativamente el consumo de energía a través de la luz del día, reduciendo cargas de HVAC (Sadineni et al., 2011). Software como: Window, VISION4, FRAME4, FRAMEPlus, FENSIZE, Frame Simulator, RESFEN, SPACER son usados para simular el desempeño térmico de las características de la fenestración. GLASTRUCT y FENSTRUCT son utilizados para simular el desempeño estructural de la fenestración. AWNSHADE, LESO-Shade, ParaSol, ShadowFX, Solar-2, Solarch, Sun Chart, SunCast, Sundi y SunPath son herramientas de diseño para asistir en el análisis de aspectos cuantitativos del diseño solar. CONTAM es un programa multizona interior de calidad y flujo de aire que ayuda a determinar las infiltraciones, exfiltraciones (Tabares-Velasco, Christensen, & Bianchi, 2012).

- HVAC

Herramientas para el diseño y análisis de HVAC (Wei, Ramalho, & Mandin, 2015) pueden clasificarse con respecto a los problemas que están destinados a solucionar (Wang et al., 2015). Aunque los problemas no sean mutuamente excluyentes, algunas herramientas pueden manejar varios, que tienden a ser investigados de forma aislada unos de otros. Las categorías son las siguientes.

Herramientas para tuberías / tamaño del conducto: son herramientas de diseño de sistemas que tienen en cuenta la distribución del flujo y el tamaño del sistema de distribución líquido/aire (AFT Fathom, DOLPHIN, Duct Calculator, DUCTSIZE, Pipe-Flo, Python, etc.).

Herramientas para selección y tamaño de equipos: ofrece tamaño de equipos HVAC (Carrier HAP, Trane TRACE 700, EnergyPlus, etc.) El tamaño de la mayoría de las herramientas está basado en procedimientos estándar y algoritmos establecidos por ejemplo por la Sociedad Americana de Ingeniería de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE), pero muchos software son distribuidos por los propietarios de productos o vendidos por fabricantes de equipos. Catálogos digitales son proporcionados por los fabricantes de equipos que pueden utilizarse para localizar un componente adecuado del modelo, para los criterios de diseño. Adicionalmente se pueden vincular al tamaño de las herramientas del equipo, por ejemplo, herramientas de Carrier HAP pueden estar relacionadas con la herramienta de selección de su enfriadora, mediante la importación de datos de rendimiento de la enfriadora real.

Herramientas para el análisis de rendimiento energético: están diseñadas para predecir el consumo anual de energía de un sistema de climatización HVAC. Basado en un sistema de ecuaciones que definen el rendimiento térmico de los edificios y sus sistemas, y con condiciones de contorno dadas, estrategia de operación y control, estas herramientas realizan simulaciones (cada hora o cada sub-hora) (Carrier HAP, Trane TRACE 700, DOE-2, Equest, EnergyPlus, ESP-r, el IDA ICE, TRNSYS, HVACSIM+, VA114, SIMBAD, etc.). Estas herramientas se utilizan normalmente para calcular y analizar el rendimiento completo o parcial de la carga, para analizar la estrategia de operación del sistema, para comparar diferentes alternativas de diseño, etc.

Herramientas para el mejoramiento del sistema: se utilizan en combinación con herramientas de análisis de rendimiento energético. En ejecuciones de simulación múltiples, un conjunto de parámetros se optimiza de acuerdo con una función objetivo dado. Un ejemplo es la herramienta genérica de mejoramiento GenOpt.

Herramientas para el análisis y mejora de control: El nivel de modelado de control de sistemas HVAC y simulación en las herramientas disponibles varía. Los controladores pueden estar asociados con modelos de alta abstracción del sistema, tal como en ESP-r. Los controladores pueden ser representados ya sea de forma explícita como los modelos de control de supervisión, como en EnergyPlus, o como modelos simples de control local, como en ESP-r y TRNSYS.

La representación más avanzada de controladores, como lógica difusa, por ejemplo, está disponible en herramientas basadas en MATLAB (SIMBAD), Dymola y herramientas acopladas a MATLAB (ESP-r, TRNSYS). Estas herramientas son eficientes para el diseño y prueba completa de controladores en un entorno de simulación, así como para las pruebas y validación del diseño del controlador en tiempo real.

Herramientas de simulación para la mejora del rendimiento en tiempo real: los beneficios del uso de herramientas de simulación en la fase operativa del edificio están todavía insuficientemente explorados. Las herramientas de simulación podrían ser utilizadas para diagnóstico de puesta en marcha (primera puesta en marcha), por ejemplo para verificar el rendimiento de todo el edificio, sus subsistemas y componentes; diagnóstico de monitoreo continuo (puesta en marcha) y diagnósticos de detección de fallos, es decir, para detectar, analizar, localizar y/o predecir problemas con los sistemas y equipos que se producen durante el funcionamiento cotidiano; emulación de un edificio y sus sistemas HVAC, es decir, la simulación de la respuesta de un edificio y sus sistemas de climatización HVAC, para la gestión del sistema de comandos de energía del edificio; y control de simulación asistida, es decir, para ejecutar un modelo de simulación como parte de la tarea de control con el fin de evaluar varios escenarios posibles y hacer una elección en términos de algunos criterios pertinentes.

- Iluminación

La luz natural es más eficiente en el suministro de iluminación en comparación con la luz eléctrica (Gago, Muneer, Knez, & Köster, 2015), mientras produce menos calor para la misma cantidad de iluminación. Algunos autores mencionan que ahorros mínimos de energía del 10% se pueden lograr mediante el uso de estrategias de solamente iluminación natural. Además, la luz del día es el espectro completo de la luz que mejor se ajusta a la respuesta visual humana. La calidad de la luz del día es mucho mejor que la luz eléctrica. Menor cantidad de iluminación luz día se necesita para realizar una tarea que bajo la luz eléctrica. Aparte de eso, la luz del día también proporciona mejor rendimiento del color y un entorno visual

que permite al ocupante ver objetos correctamente en una sala (Lim, Kandar, Ahmad, Ossen, & Abdullah, 2012).

El principal inconveniente para aprovechar la luz del día en el clima tropical, es la alta intensidad de la radiación solar, que dará como resultado un aumento no deseado del calor solar (González Couret, Rodríguez Díaz, & Abreu de la Rosa, 2013). Aparte de eso, la luz día no controlada puede conducir a brillo excesivo sobre todo cuando se trabaja con computadores. El uso inadecuado de las protecciones solares sacrificará la luz del día natural y crea deslumbramientos molestos. Muchos usuarios de edificios cierran sus ventanas totalmente con persianas, con el fin de evitar el deslumbramiento. Como resultado, la abundancia de la luz del día en el clima tropical no es bien utilizada. Por lo tanto, el equilibrio entre la prevención de las ganancias de calor, control de deslumbramiento molesto y aprovechamiento de luz del día, es muy importante para el desarrollo eficiente de la energía y soluciones de diseño visual comfortable.

La iluminación natural en los edificios requiere un diseño correcto de arquitectura pasiva, para proporcionar una iluminación suficiente a cierta distancia en el interior del edificio, pero también puede causar deslumbramiento, sobrecalentamiento y altos costos de energía para calefacción o enfriamiento. Por lo tanto, la iluminación artificial es necesaria para complementar la luz del día, con carácter temporal o permanente (Da Silva, Leal, & Andersen, 2012). La luz eléctrica es uno de los elementos de mayor consumo de energía en los edificios, representa entre el 20% y el 30% del consumo total de electricidad en edificios de oficinas y el 10% para el sector residencial. La luz natural es un medio económico de iluminación para un edificio (Kolokotsa, Rovas, Kosmatopoulos, & Kalaitzakis, 2011).

El uso de claraboyas es frecuente en la arquitectura moderna, ya que permiten el acceso a la luz natural en edificios que carecen de fachadas, mientras que proporciona iluminación homogénea sobre el plano horizontal. La mayoría de los investigadores en este campo han basado su metodología en tratados clásicos sobre iluminación natural y simulación por computador. Otros autores, ofrecen una investigación en profundidad sobre tragaluces abiertos, analizando sus ventajas e inconvenientes (Acosta, Navarro, & Sendra, 2013). McCluney, basando su investigación en la formulación analítica desarrollada por la Illuminating Engineering Society of North America (IESNA) y en los datos estadísticos sobre el comportamiento de los tragaluces, creó SKYSIZE, el primer programa de cálculo de iluminación natural aplicado en las calculadoras programables.

Más recientemente Tsangrassoulis (Tsangrassoulis & Santamouris, 2000), utilizando el método para la transferencia de flujo desarrollado por Bouchet y Fontoynt, estudiaron la eficacia de claraboyas circulares y la cantidad de luz que estas claraboyas permitían en un recinto. En 2003, el National Research Council de Canadá desarrolló SkyVision, un programa de simulación dedicado exclusivamente a los tragaluz abiertos o focales. Este programa se basa en cuatro factores: características ópticas de los cristales, tipo de montaje del acristalamiento, cálculo de iluminación natural mediante trazado de rayos, nubes y condiciones establecidos por la International Commission of Illumination (CIE). A pesar de las limitaciones en términos de tipos de tragaluz, ya que sólo cubre claraboyas abiertas, el programa obtiene resultados muy precisos, como se muestra por Laouadi et. al (Laouadi, Atif, & Galasiu, 2003).

También existen muchas herramientas de simulación que facilitan enormemente la tarea de diseñar sistemas de iluminación tanto para interiores como exteriores. DIALux, programa del Instituto Alemán de Luminotecnia Aplicada (Deutsches Institut für angewandte Lichttechnik) permite el análisis cuantitativo rápido y sin problemas de un proyecto, y cuenta con una funcionalidad sencilla de renderización 3D. Es útil para cálculos de iluminación interior, exterior y vial, trabaja con catálogos reales de fábricas europeas. Lumenlux de la empresa Lumenac tiene la capacidad de realizar proyectos en exterior e interior. Los proyectos se realizan mediante un práctico esquema de pantallas sucesivas. CALCULUX de Philips, permite calcular luminarias. Saca las curvas de temperatura de los locales según el tipo e intensidad de luminaria, y pone los resultados en planillas y gráficos.

- Energías renovables

Las tecnologías más comunes para la utilización de la energía solar son sistemas térmicos y fotovoltaicos (Lu, Wang, Zhao, & Yan, 2015). Uno de los principales factores que influyen para un rendimiento económicamente viable de los sistemas de energía solar (además de los costos de instalación, costos de operación y vida útil de los componentes del sistema) es la disponibilidad de energía solar en la superficie del suelo que puede ser convertida en calor o electricidad (Horvat & Wall, 2012). Por lo tanto, datos precisos de radiación solar son de suma importancia para la planificación y operación exitosa de sistemas de energía solar. Irradiación solar significa la cantidad de energía que llega a una unidad de superficie en un intervalo de tiempo indicado, expresado como Wh/m^2 . La radiación solar se puede dividir en radiación directa y difusa. Juntos, estos componentes se indican como irradiación global. La distinción entre la radiación directa y difusa es importante ya que las diferentes tecnologías utilizan diferentes formas de energía solar (Kanters, Horvat, & Dubois, 2014).

El cálculo de un potencial de energía solar disponible, se expresa como la radiación solar disponible físicamente en la superficie de la tierra, que está influido por diversos factores, como: geometría de la tierra, rotación y translación, el terreno en términos de elevación, inclinación y orientación de la superficie, sombras, así como la atenuación atmosférica debido a la dispersión y absorción por gases, partículas sólidas, líquidas y nubes (Shi & Chew, 2012). El potencial estimado se reduce teniendo en cuenta las limitaciones técnicas (por ejemplo, factores de eficiencia de conversión), lo que implica tener en cuenta las pérdidas asociadas con la conversión de la radiación solar en energía eléctrica o calor según el estado de las tecnologías más avanzadas.

Existen diferentes enfoques para estimar la radiación solar en la superficie terrestre. Un primer planteamiento se basa en datos in situ, un segundo método deriva datos de radiación solar a partir de datos de satélite, y, por último, una tercera es una combinación de ambos. El potencial solar disponible se reduce a lo que es económicamente explotable, por la integración de los factores limitantes con respecto a las áreas adecuadas, técnicos y factores económicos (Bornatico, Pfeiffer, Witzig, & Guzzella, 2012). Restricciones geográficas para la instalación de sistemas de energía solar se incluyen para obtener sólo las áreas adecuadas, mediante el uso de mapas de cobertura terrestre. Esta evaluación también depende del tipo de instalaciones solares. Mientras que las instalaciones centralizadas con conexión a la red se supone que están instaladas en la superficie de la tierra, las aplicaciones descentralizadas se asignan a los tejados o fachadas. Concentración de energía solar (CSP), por ejemplo, es la más adecuada en las áreas descubiertas con una alta participación de la irradiación directa (Cucchiella, D'Adamo, Gastaldi, & Koh, 2012).

Otros factores locales pueden desempeñar un papel en la estimación detallada del rendimiento de los sistemas de energía solar, por ejemplo, la influencia de la temperatura. Finalmente, los factores económicos también pueden ser esenciales para determinar la viabilidad de un proyecto. En comparación con otros portadores de energía renovables como la eólica y la biomasa (Erdinc & Uzunoglu, 2012), la energía solar también puede recolectarse en zonas densamente pobladas. Mejoras adicionales pueden esperarse sobre todo en la selección explícita de tejados adecuados con respecto a la orientación e inclinación, incluyendo también el sombreado de partes vecinas de edificios o árboles. Especialmente la competencia por áreas de instalación entre los diferentes tipos de sistemas solares (PV, calefacción solar) en caso de uso descentralizado tienen que ser incluidas estimaciones potenciales, teniendo en cuenta que las eficiencias de estos sistemas difieren sustancialmente, así como el uso final de la energía: la energía eléctrica

puede ser devuelta a la red, cuando no se utiliza, mientras que la energía térmica puede ser explotada sólo a nivel local y con una capacidad de almacenamiento limitada (Sharma, Varun, & Siddhartha, 2012).

HOMER es una herramienta de simulación para el diseño y análisis de sistemas híbridos de energía, que contienen una mezcla de generadores convencionales, cogeneración, turbinas eólicas, energía solar fotovoltaica, energía hidroeléctrica, biomasa y otros insumos. Para cualquiera sistema conectado a la red o aislado, HOMER ayuda a determinar cómo los recursos variables, como la eólica y la solar pueden ser perfectamente integrados en los sistemas híbridos. ACSOL es una colección de programas para calcular las prestaciones de sistemas solares térmicos de baja temperatura. El programa de Dimensionamiento de Instalaciones Fotovoltaicas, Eólicas y Mixtas, DIAFEM, es una herramienta de cálculo completa y fiable para el diseño de instalaciones fotovoltaicas, eólicas o mixtas (fotovoltaicas y eólicas) para aplicaciones aisladas como la electrificación rural.

3. Metodología

La eficiencia energética significa la utilización de la cantidad mínima de energía para calefacción, refrigeración, iluminación que se requiere para mantener las condiciones de confort en un edificio. Un factor importante que afecta a la eficiencia energética es la envolvente del edificio, esto incluye todos los elementos de construcción entre el interior y el exterior del edificio, tales como: paredes, ventanas, puertas, techos y cimientos. Todos estos componentes deben trabajar juntos con el fin de mantener el edificio caliente en épocas frías y fresco en épocas calientes (Fumo, Mago, & Luck, 2010).

La cantidad de energía que se consume varía en función del diseño de la estructura del edificio, (Adamski, 2007), sus sistemas y de cómo se opera. Los sistemas de calefacción y refrigeración son los que consumen más energía en un edificio, sin embargo los controles, tales como termostatos programables y los sistemas de gestión de energía en edificios pueden reducir significativamente el uso de la energía de estos sistemas. Algunos edificios también utilizan sistemas de calefacción y refrigeración en zona, lo que puede reducir la calefacción y refrigeración en las áreas no utilizadas de un edificio (Chow, Zhang, Lin, & Song, 2002). Las oportunidades para reducir al mínimo las necesidades de energía mediante la eficiencia energética y las energías renovables en los edificios comprenden el diseño de edificios, los materiales de construcción, la calefacción, la refrigeración, la iluminación y los equipos eléctricos (Caldas, 2008).

La predicción del potencial de ahorro de energía es esencial para los gestores de la construcción y los ingenieros de servicios al considerar cualquier trabajo de adaptación del edificio. Un método exacto para predecir el potencial de ahorro de un edificio es una herramienta importante para reducir el riesgo de dirigir recursos importantes a la adaptación de edificios que al final no conlleve a la obtención del ahorro deseado. Es una herramienta estratégica que puede llevar a proyectos de mejora de la energía convirtiéndolo en una zona viable de inversión financiera. Esto podría significativamente promover el sector de servicios de la energía (Liu & Harris, 2008). En este capítulo se presenta una metodología basada en herramientas computacionales que permitan estimar el ahorro en el consumo de

energía en un edificio terciario y así promover el uso racional y eficiente de la energía eléctrica en este sector.

3.1 Identificación y selección de las herramientas

En las últimas décadas se han desarrollado un gran número de herramientas de simulación. La página del Departamento de Energía (DOE) de Estados Unidos (http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/alpha_list.cfm) lista más de 400 herramientas de software para la evaluación de la eficiencia energética, energías renovables y la sostenibilidad en los edificios. Las herramientas del manejo de la energía que figuran en este directorio incluyen bases de datos, hojas de cálculo de los componentes, análisis de sistemas, y programas de simulación de eficiencia energética. Para cada herramienta se presenta en el directorio una breve descripción junto con otra información, incluyendo los conocimientos necesarios, los usuarios, el público al cual va dirigida la herramienta, entradas, salidas, plataformas informáticas, lenguaje de programación, fortalezas, debilidades, contacto técnico y la disponibilidad. El visitante del directorio web puede listar este software de acuerdo con el tema, la plataforma y el país.

A partir del listado de herramientas entregado por el Departamento de Energía de Estados Unidos, se analizaron las herramientas que se identificaban como gratuitas. Esta evaluación se hizo a partir de la clasificación presentada en la página web donde cataloga las herramientas en cuatro grandes áreas: iluminación, envolvente, HVAC y otras que incluye renovables. En la Tabla 3.1 se muestra la cantidad de herramientas en cada categoría y las clasificadas como gratuitas.

Tabla 3.1. Número de herramientas listadas en la página del DOE. Fuente: Autor a partir de la información suministrada por el DOE

Categoría	No. herramientas	No. herramientas gratuitas
Iluminación	50	17
Envolvente	70	26
HVAC	119	22
Otras	177	42
Total	416	107

De cada herramienta gratuita se revisó el nivel de experticia requerido para su manejo, la audiencia a la cual está dirigida la herramienta, las entradas con las que se alimenta la herramienta y las salidas o resultados de la misma. Adicionalmente,

se consideró la plataforma sobre la que funciona la herramienta y sus fortalezas y debilidades. Una vez analizadas estas características y otras determinadas en los manuales de usuario de las diferentes herramientas, se procedió a seleccionar una para cada categoría y a aplicarla en la metodología propuesta a continuación.

3.2 Metodología para el uso eficiente de la energía eléctrica en edificios terciarios

El uso final eficiente de la energía es un factor clave para mejorar la relación costo-efectividad de una economía nacional y para controlar los costos de energía de los sectores comerciales, público y residencial. El impacto ambiental del entorno construido tiende a convertirse en uno de los aspectos más importantes en el diseño de edificios en los que las personas viven y trabajan. Los edificios son responsables de aproximadamente el 40% del consumo mundial de energía anual (Marszal et al., 2011). La mayor parte de esta energía es utilizada en alumbrado, calefacción, refrigeración y aire acondicionado y es conveniente reducir esta energía requerida.

Con el fin de evaluar el potencial de ahorro energético en los diferentes sistemas de los edificios terciarios, es importante apoyarse en las diferentes herramientas de simulación gratuitas existentes para obtener así los aspectos técnico-económicos que pudieran mejorarse sin afectar el buen funcionamiento del edificio y el confort de los ocupantes. La metodología presentada a continuación se apoya fundamentalmente en el uso de siete herramientas de simulación: herramientas para evaluar técnicamente las mejoras de cada gran sistema descrito anteriormente y adicionalmente una herramienta para apoyarse en la obtención de costos y una herramienta para evaluar la viabilidad económica de las medidas que se pudieran implementar. La Figura 3.1 presenta el diagrama de bloques de la metodología.

3.2.1 Iluminación

Para evaluar el potencial de ahorro en el sistema de iluminación de los edificios se escogió la herramienta DIALux evo de DIAL GmbH (<http://www.dial.de/DIAL/en/home.html>). DIALux evo es un programa de planificación de iluminación para el cálculo y visualización de sistemas de iluminación interior y exterior. Realiza el cálculo de acuerdo con todas las normas internacionales, como EN12464, ISO 8995, EN1838, EN13201 y muchas más. Los

resultados son validados y probados contra normas internacionales y en el laboratorio de iluminación acreditado de DIAL.

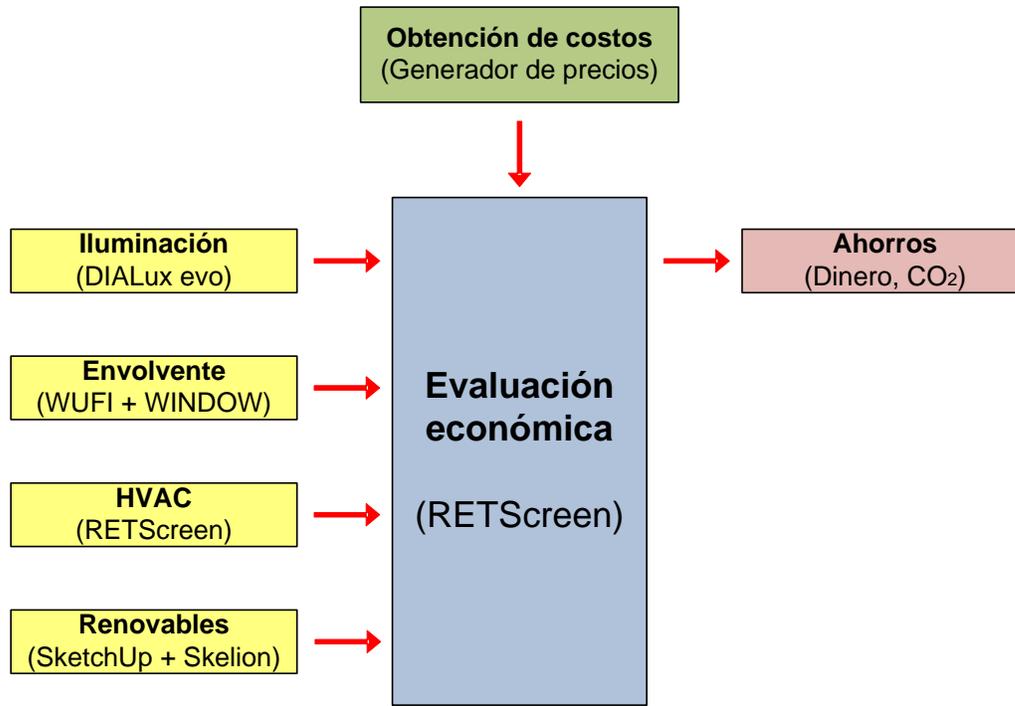


Figura 3.1. Metodología para evaluar el ahorro energético en edificios terciarios.

Fuente: Autor

En cuanto a la experiencia requerida para el manejo, la herramienta es muy fácil de aprender y está dirigida a cualquier persona que haga diseño de iluminación como arquitectos, oficinas de ingeniería, electricistas, fabricantes y distribuidores de luminarias, etc. Los parámetros de entrada son la geometría del edificio que se puede crear en DIALux mismo o se puede importar como un archivo DWG o DXF, y las luminarias que se pueden importar de catálogos electrónicos de más de 150 fabricantes. La herramienta entrega, entre otros resultados, los niveles de iluminación y la potencia del sistema. Su mayor fortaleza es que permite realizar tanto el diseño arquitectónico como de iluminación técnica. La geometría se puede crear a partir de un archivo DWG/DXF o como construcción libre y consta de un sitio con un edificio, que puede tener uno o varios pisos y estos a su vez pueden tener uno o varios cuartos (ver Figura 3.2).

Una vez se ha creado la geometría se pueden incluir las aberturas del edificio, las cuales pueden ser ventanas, puertas y claraboyas; o también los diferentes elementos que hacen parte del cuarto, como columnas, escalones, rampas y vigas (ver Figura 3.3). Finalmente, se debe incluir el techo del edificio.

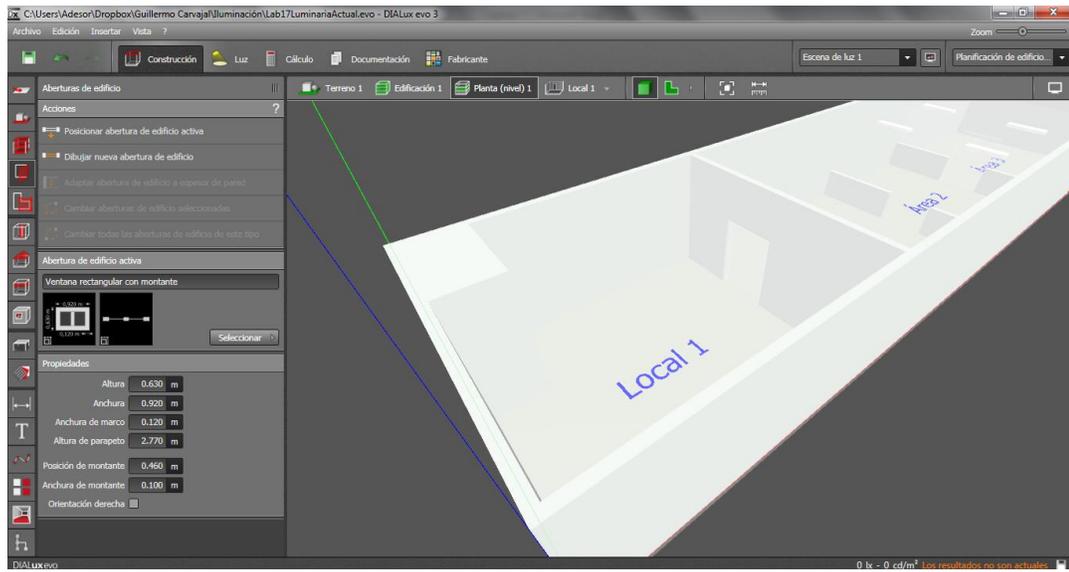


Figura 3.2. Ejemplo de edificio con varios cuartos en DIALux evo. Fuente: Autor

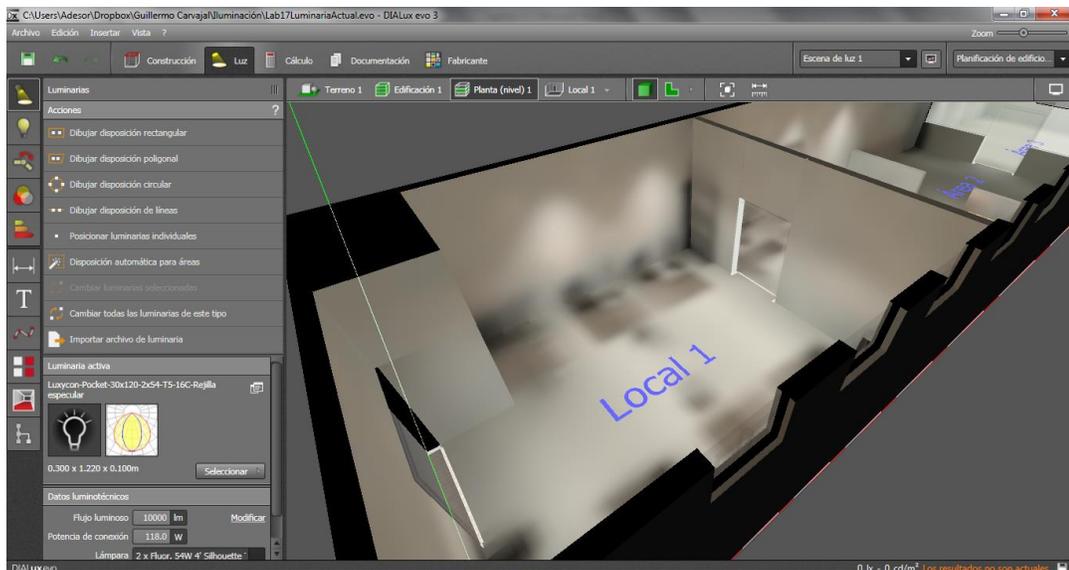


Figura 3.3. Ingreso de puertas y ventanas en DIALux evo. Fuente: Autor

Dentro del edificio se pueden insertar muebles o se pueden crear los propios muebles combinando cuerpos estándar (ver Figura 3.4). Posteriormente, con la herramienta de materiales se puede asignar una textura a todas las superficies dentro del edificio o editar una textura existente. Cada textura tiene información sobre color, tipo de material, factor de reflexión, grado de transmisión e índice de refracción.

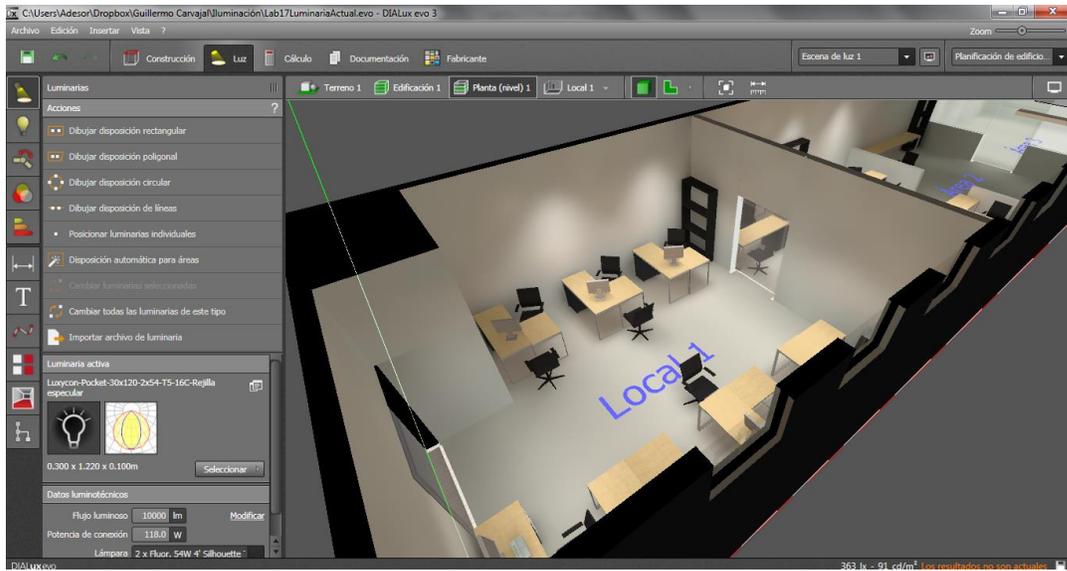


Figura 3.4. Inclusión de mobiliario en DIALux evo. Fuente: Autor

Por último, se deben insertar las luminarias las cuales se pueden escoger de un amplio catálogo de diferentes constructores. Cada luminaria tiene información sobre datos lumotécnicos, flujo de potencia, potencia de conexión y el tipo de lámpara. La herramienta tiene un asistente para la inclusión del arreglo de luminarias ya sea para obtener una iluminación uniforme en el plano de trabajo o para obtener una iluminancia promedio sobre el plano de trabajo. Después del cálculo del número de luminarias necesarias, la herramienta las organiza simétricamente (ver Figura 3.5).

Una vez se ha incluido toda la información descrita anteriormente, se procede a la evaluación de la escena. En esta etapa se define la creación de escenas de luz e interpretación de resultados para determinar el tipo de información que se desea presentar en los informes. En cada espacio se pueden presentar los resultados en términos de isolíneas o de colores falsos. Adicionalmente se puede obtener la iluminancia perpendicular y la luminancia (ver Figura 3.6).

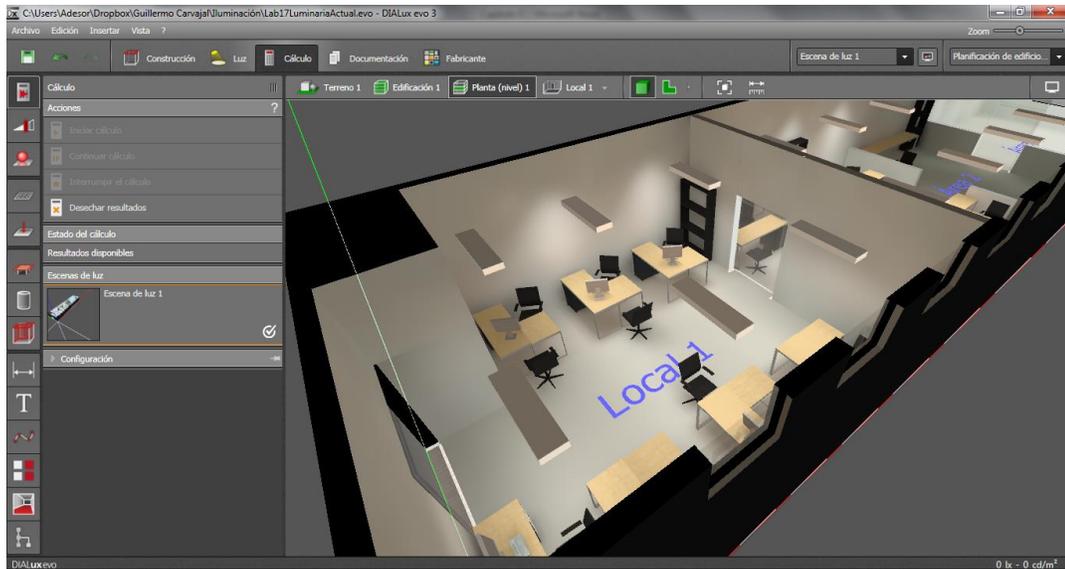


Figura 3.5. Inclusión de luminaria en DIALux evo. Fuente: Autor

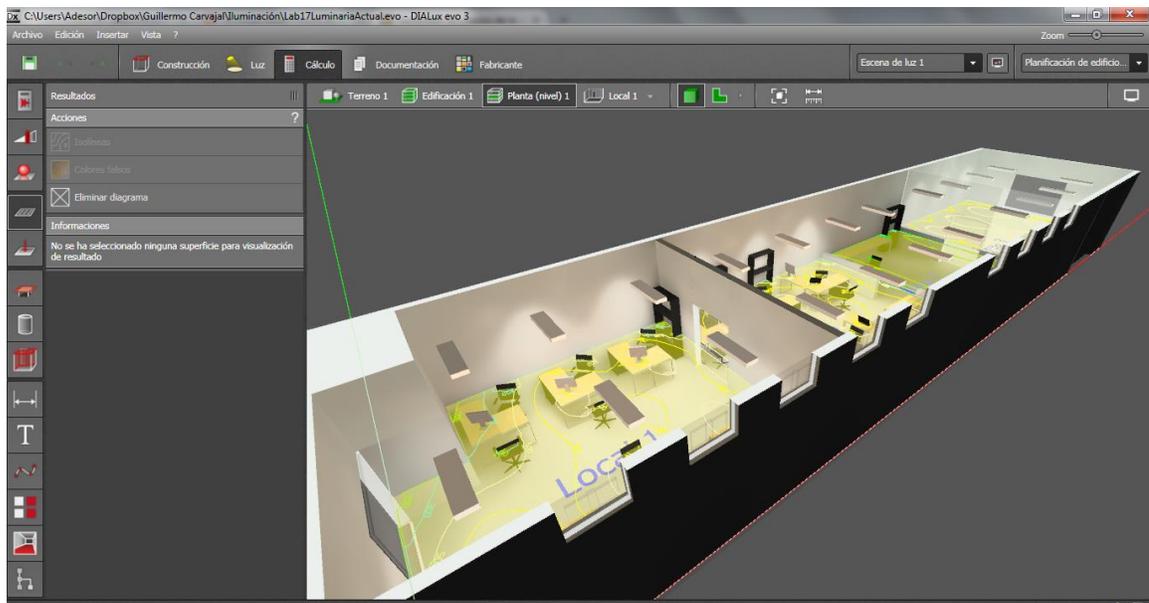


Figura 3.6. Resultado de isólineas en DIALux evo. Fuente: Autor

3.2.2 Envoltente

La envoltente del edificio consiste de todos los elementos que están en contacto con el exterior, esto incluye los muros, techos, pisos y las ventanas. Para obtener los principales parámetros de los materiales utilizados en la construcción de los edificios se utilizaron las herramientas WUFI ORNL 5.3 y WINDOW 7.3., WUFI ORNL 5.3 (http://www.wufi.de/index_e.html) es un programa para el cálculo tanto de la transferencia de calor como de la humedad en componentes de edificios.

Realiza el cálculo del comportamiento higrotérmico transitorio de los componentes multicapa de un edificio, expuestos a condiciones climáticas naturales. Utiliza un modelo desarrollado entre el Laboratorio Nacional de Oak Ridge y el Instituto Fraunhofer de Física de la Construcción. Las herramientas han sido validadas a través de numerosos estudios en áreas de prueba exteriores del Instituto Fraunhofer.

La herramienta es fácil de usar, sin embargo, se requiere un nivel bajo de conocimientos informáticos y de los fundamentos de la ciencia de la construcción. Está dirigida a consultores, arquitectos, diseñadores, ingenieros, estudiantes de ingeniería, inspectores de código y universidades. La interfaz gráfica ayuda a que el usuario introduzca la geometría de la construcción, las características interiores y exteriores de la superficie, las propiedades de los materiales que se pueden encontrar en una amplia base de datos, las condiciones iniciales y las condiciones climáticas interiores y exteriores (ver Figura 3.7). La herramienta arroja información sobre la temperatura, humedad relativa y contenido de humedad. El contenido de humedad de cada capa de construcción se representa gráficamente como una función del tiempo. Su mayor fortaleza es que la herramienta es sencilla de utilizar y es excelente para el diseño de la humedad. Sus mayores debilidades es que la versión gratuita es unidimensional y la base de datos está limitada a materiales de construcción en América del Norte.

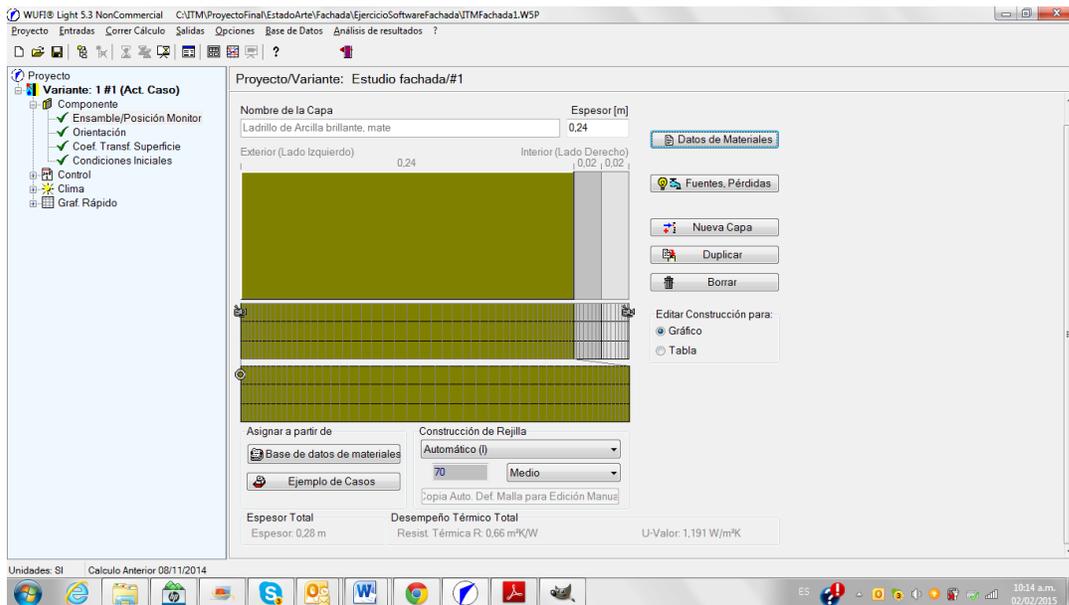


Figura 3.7. Construcción del componente en WUFI. Fuente: Autor

En primer lugar, se introducen las capas individuales del componente de la envolvente y su respectivo espesor. El componente se divide en elementos de rejilla numéricos cuyas anchuras son elegidos de acuerdo con la variación de la temperatura y la humedad prevista para la ubicación respectiva. Posteriormente, se ingresan los datos de los materiales. Los datos higrotérmicos para cada capa pueden tomarse de la base de datos de WUFI o introducirse manualmente. Como mínimo, WUFI requiere la densidad aparente, la porosidad, la capacidad de calor específico, la conductividad de calor (seco) y el factor de resistencia a la difusión (seco). Dependiendo del objeto y el propósito del cálculo, se pueden introducir datos adicionales: función de almacenamiento de humedad, coeficientes de transporte de líquidos para la succión y la redistribución, conductividad térmica dependiente de la humedad y el factor de resistencia a la difusión dependiente de la humedad (ver Figura 3.8).

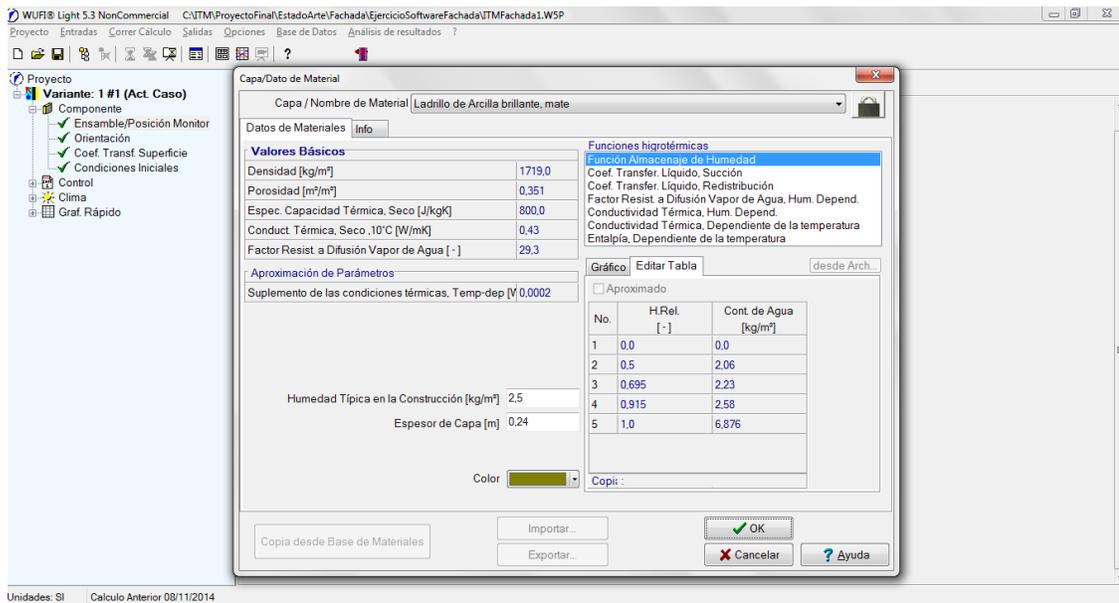


Figura 3.8. Visualización de propiedades de material en WUFI. Fuente: Autor

Por último, se ingresan los datos del clima. Las condiciones de contorno que actúan sobre la envolvente del edificio son la temperatura y la humedad relativa del aire interior y exterior y las cargas de lluvia y de radiación, tanto en función de la inclinación como de la orientación del componente del edificio. Estos datos se pueden obtener de los datos meteorológicos medidos (ver Figura 3.9). Los pasos de tiempo para los datos sobre el clima y el cálculo se pueden seleccionar a discreción del usuario, para la mayoría de los casos es apropiado usar los valores por hora.

WUFI entonces calcula la evolución temporal de la temperatura y de la humedad en el componente. Durante el cálculo, WUFI muestra opcionalmente los campos de temperatura y humedad recién calculados después de cada paso, lo que permite ver los procesos en el componente. La herramienta calcula el flujo de calor a través de las densidades de la superficie interior y exterior, las temperaturas y humedades relativas, el contenido de humedad media de cada material y el contenido total de humedad de todo el componente del edificio (ver Figura 3.10).

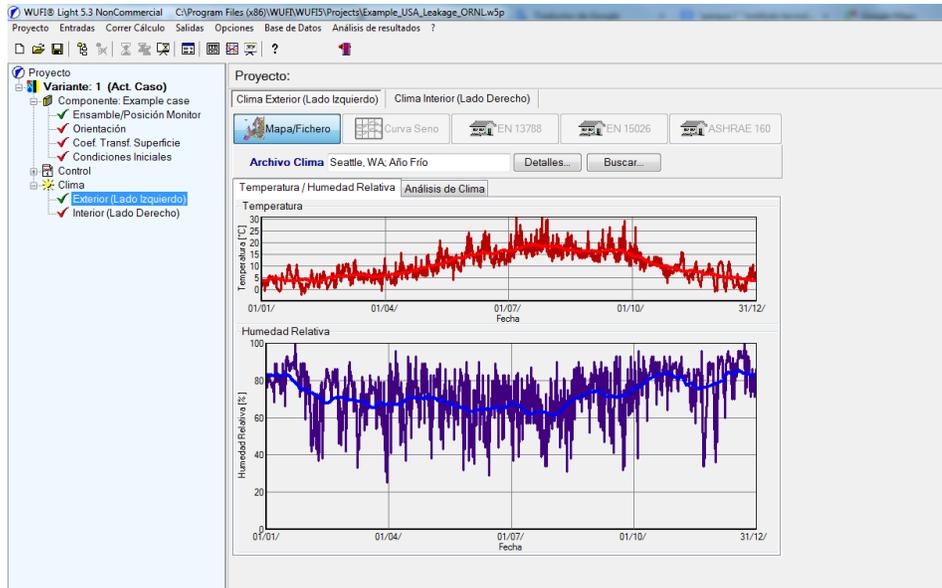


Figura 3.9. Selección de datos climáticos en WUFI. Fuente: Autor

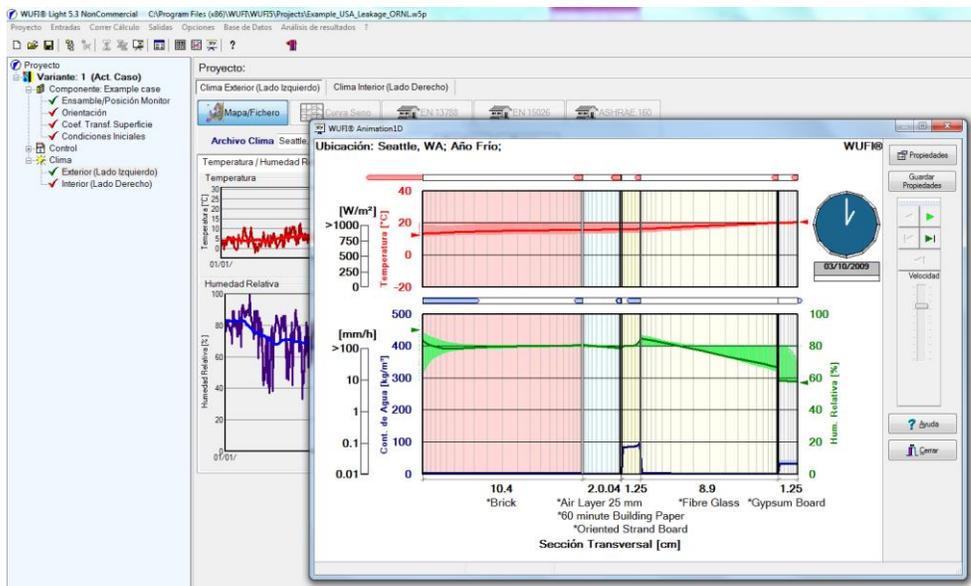


Figura 3.10. Visualización de resultados en WUFI. Fuente: Autor

Aunque WUFI permite realizar una serie de cálculos respecto al comportamiento higrotérmico de un componente de un edificio, lo cual está estrechamente relacionado con la pérdida de calor y el transporte de humedad, en este trabajo solo se utilizó la herramienta con el fin de obtener las propiedades de los componentes del edificio a partir de su construcción por capas.

La otra herramienta usada en el sistema de envolvente fue WINDOW 7.3 (<http://windows.lbl.gov/software/window/window.html>). Esta herramienta calcula el rendimiento térmico de los productos usados en las ventanas a partir del método de análisis de la transferencia de calor de conformidad con el procedimiento de calificación desarrollado por el National Fenestration Rating Council (NFRC). Para utilizar la herramienta solo se requieren algunos conocimientos acerca de las ventanas, por lo que está dirigida a fabricantes, ingenieros, arquitectos, investigadores y personal de ventas. La herramienta permite introducir la información sobre los componentes de la ventana (vidrio, marco, elementos de sombreado, etc.) y calcula entre otros parámetros el factor U y el coeficiente de ganancia solar (ver Figura 3.11). La herramienta es fácil de aprender a usar y es coherente con los procedimientos de ASHRAE y NFRC, los resultados se pueden integrar con los programas de simulación de DOE-2 y EnergyPlus.

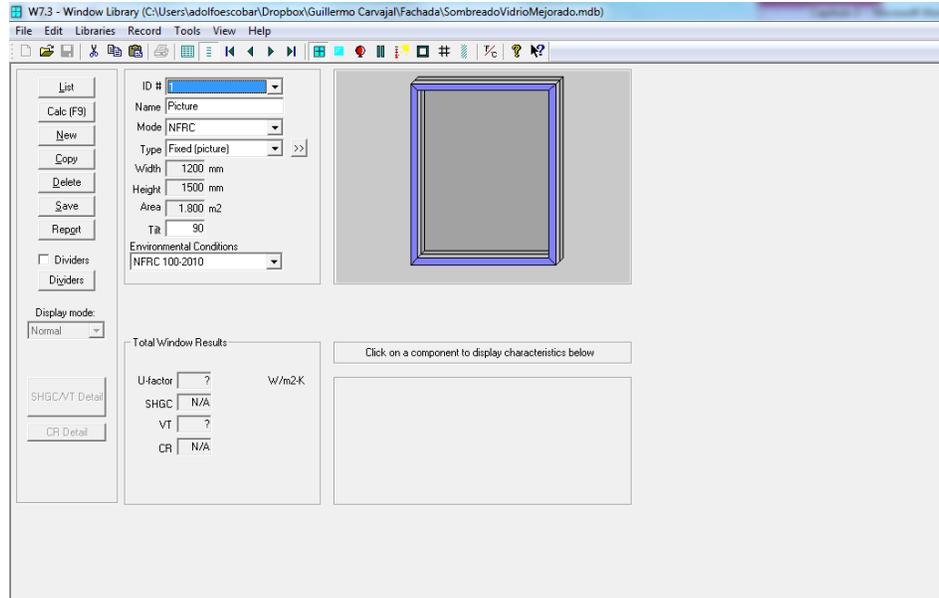


Figura 3.11. Diseño de ventana en WINDOW. Fuente: Autor

El sistema de acristalamiento se crea mediante la especificación de capas de vidrio que se pueden obtener de la biblioteca de vidrio, así como el gas de relleno entre las capas, tal como aire o argón. Adicionalmente, se le puede agregar sistemas de sombreado. Cuando se define un sistema de acristalamiento, se deben especificar

el número de capas que lo componen, la inclinación, y las condiciones ambientales. Las capas de vidrio de la biblioteca de vidrio utilizan información de registros aprobados de la base de datos internacional de acristalamiento (ver Figura 3.12).

ID	Name	ProductName	Manufacturer	Source	Mode	Color	Thickness mm	Tsol	Rsol1	Rsol2	Tvis	Rvis1	Rvis2	Tr	emis1	emis2	Cond W/mK
100	BRONZE_3.DAT	Generic Bronze Glass	Generic	IGDB v11.4	#		3.124	0.846	0.062	0.083	0.880	0.095	0.065	0.000	0.840	0.840	1.000
101	BRONZE_6.DAT	Generic Bronze Glass	Generic	IGDB v11.4	#		5.740	0.486	0.053	0.053	0.533	0.056	0.056	0.000	0.840	0.840	1.000
102	CLEAR_3.DAT	Generic Clear Glass	Generic	IGDB v11.4	#		3.048	0.834	0.075	0.075	0.899	0.083	0.083	0.000	0.840	0.840	1.000
103	CLEAR_6.DAT	Generic Clear Glass	Generic	IGDB v11.4	#		5.715	0.771	0.070	0.070	0.884	0.080	0.080	0.000	0.840	0.840	1.000
104	GRAY_3.DAT	Generic Grey Glass	Generic	IGDB v11.4	#		3.124	0.609	0.060	0.061	0.617	0.062	0.063	0.000	0.840	0.840	1.000
200	SAq25LE_3wv.bsf	Silver AG 25 Low-E	Saint-Gobain Solar Gard LLC	IGDB v16.3	#		3.023	0.156	0.546	0.616	0.222	0.417	0.476	0.000	0.840	0.330	0.942
201	AuB30_3wv.bsf	Autumn Bronze 30	Saint-Gobain Solar Gard LLC	IGDB v17.0	#		3.023	0.244	0.467	0.318	0.343	0.238	0.156	0.000	0.840	0.770	0.942
202	H70_3.bsf	Hite 70	Saint-Gobain Solar Gard LLC	IGDB v16.3	#		3.277	0.368	0.353	0.415	0.721	0.088	0.088	0.000	0.840	0.770	0.950
203	H70_8.bsf	8 Mil Hite 70	Saint-Gobain Solar Gard LLC	IGDB v16.3	#		3.404	0.381	0.316	0.403	0.722	0.095	0.096	0.000	0.840	0.730	0.878
204	NS20_3.bsf	NightSky 20	Saint-Gobain Solar Gard LLC	IGDB v17.4	#		3.251	0.238	0.113	0.108	0.201	0.132	0.116	0.000	0.840	0.860	0.966
205	NS30_3.bsf	NightSky 30	Saint-Gobain Solar Gard LLC	IGDB v17.4	#		3.251	0.354	0.089	0.092	0.316	0.098	0.088	0.000	0.840	0.880	0.966
206	H40_3.bsf	Hite 40	Saint-Gobain Solar Gard LLC	IGDB v17.4	#		3.276	0.274	0.299	0.394	0.420	0.059	0.066	0.000	0.840	0.750	0.950
207	SB20_3wv.bsf	Solar Bronze 20	Saint-Gobain Solar Gard LLC	IGDB v16.3	#		3.023	0.130	0.612	0.610	0.223	0.383	0.361	0.000	0.840	0.660	0.942
209	SB35_3wv.bsf	Solar Bronze 35	Saint-Gobain Solar Gard LLC	IGDB v16.3	#		3.023	0.224	0.538	0.532	0.353	0.300	0.275	0.000	0.840	0.680	0.942
210	SB45_4_3wv.bsf	4 Mil Solar Bronze 35	Saint-Gobain Solar Gard LLC	IGDB v16.3	#		3.073	0.207	0.525	0.520	0.322	0.296	0.272	0.000	0.840	0.680	0.891
211	SB50_3wv.bsf	Solar Bronze 50	Saint-Gobain Solar Gard LLC	IGDB v16.3	#		3.023	0.317	0.495	0.448	0.453	0.235	0.211	0.000	0.840	0.690	0.942
212	NS10_3.bsf	NightSky 10	Saint-Gobain Solar Gard LLC	IGDB v17.4	#		3.251	0.188	0.137	0.130	0.095	0.155	0.140	0.000	0.840	0.670	0.966
213	SI20_3wv.bsf	Silver 20	Saint-Gobain Solar Gard LLC	IGDB v16.3	#		3.023	0.125	0.630	0.629	0.166	0.605	0.585	0.000	0.840	0.700	0.942
214	SI20_10_3wv.bsf	10 Mil Silver 20	Saint-Gobain Solar Gard LLC	IGDB v16.3	#		3.226	0.130	0.639	0.606	0.176	0.593	0.559	0.000	0.840	0.700	0.774
215	SI20_4_3wv.bsf	4 Mil Silver 20	Saint-Gobain Solar Gard LLC	IGDB v16.3	#		3.073	0.115	0.626	0.643	0.153	0.607	0.602	0.000	0.840	0.710	0.891
216	SI20_8_3wv.bsf	8 Mil Silver 20	Saint-Gobain Solar Gard LLC	IGDB v16.3	#		3.175	0.110	0.615	0.637	0.146	0.601	0.593	0.000	0.840	0.700	0.898
217	SI35_3wv.bsf	Silver 35	Saint-Gobain Solar Gard LLC	IGDB v16.3	#		3.023	0.275	0.440	0.424	0.349	0.389	0.358	0.000	0.840	0.730	0.942
218	SI35_8_3wv.bsf	8 Mil Silver 35	Saint-Gobain Solar Gard LLC	IGDB v16.3	#		3.175	0.281	0.405	0.393	0.360	0.364	0.332	0.000	0.840	0.710	0.898
219	SI50_3wv.bsf	Silver 50	Saint-Gobain Solar Gard LLC	IGDB v16.3	#		3.010	0.428	0.280	0.284	0.534	0.238	0.218	0.000	0.840	0.770	0.955
220	TV40_3.bsf	TrueVue 40	Saint-Gobain Solar Gard LLC	IGDB v17.4	#		3.251	0.376	0.217	0.235	0.391	0.144	0.096	0.000	0.840	0.750	0.966
221	TV5_3.bsf	TrueVue 5	Saint-Gobain Solar Gard LLC	IGDB v17.4	#		3.251	0.059	0.514	0.445	0.052	0.451	0.083	0.000	0.840	0.750	0.966
222	SI10_3wv.bsf	Slate 10	Saint-Gobain Solar Gard LLC	IGDB v16.3	#		3.035	0.087	0.587	0.283	0.119	0.459	0.212	0.000	0.840	0.820	0.928
223	SI20_3wv.bsf	Slate 20	Saint-Gobain Solar Gard LLC	IGDB v16.3	#		3.035	0.177	0.452	0.225	0.232	0.323	0.168	0.000	0.840	0.840	0.928
224	SI30_3wv.bsf	Slate 30	Saint-Gobain Solar Gard LLC	IGDB v16.3	#		3.035	0.246	0.359	0.192	0.304	0.249	0.143	0.000	0.840	0.840	0.928
225	SI40_3wv.bsf	Slate 40	Saint-Gobain Solar Gard LLC	IGDB v16.3	#		3.035	0.375	0.276	0.170	0.451	0.183	0.117	0.000	0.840	0.810	0.928
226	SI50_3wv.bsf	Stainless Steel 10	Saint-Gobain Solar Gard LLC	IGDB v16.3	#		3.023	0.099	0.433	0.417	0.092	0.444	0.418	0.000	0.840	0.730	0.942

Figura 3.12. Base de datos de vidrios en WINDOW. Fuente: Autor

Con la información de los componentes del sistema de acristalamiento, la herramienta calcula el factor U, el factor de transmitancia de calor, el coeficiente de ganancia de calor solar, la fracción de la radiación solar incidente admitida a través de la ventana, la transmitancia visible, y la propiedad óptica que indica la fracción de luz visible transmitida a través de la ventana (ver Figura 3.13).

3.2.3 HVAC

A pesar de encontrar varias herramientas gratuitas enfocadas a los sistemas HVAC de los edificios, se encontraron algunos problemas para su uso en la metodología como: la mayoría de ellas exigían un nivel de experticia alto para su utilización y analizaban varios aspectos en simultánea lo que no permitía hacer un análisis exclusivo del sistema. Igualmente, se determinó que el nivel de intervención que se podría realizar en el sistema HVAC existente en el edificio del caso de estudio era mínimo ya que es un sistema de enfriamiento nuevo. Por estas razones se decidió no utilizar una herramienta especial para evaluar el sistema HVAC sino que se decidió valorar las posibles mejoras modificando directamente el apartado correspondiente a este sistema en la herramienta de evaluación económica (RETScreen), la cual se describirá detalladamente más adelante.

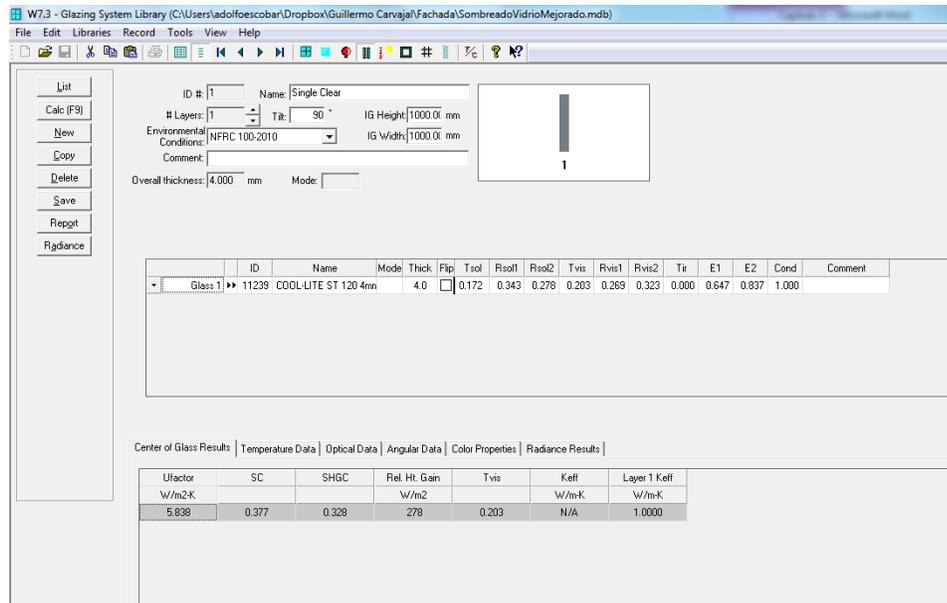


Figura 3.13. Cálculo de propiedades en WINDOW. Fuente: Autor

En este apartado se debe incluir la información correspondiente al tipo de combustible utilizado para alimentar el sistema, el coeficiente de rendimiento estacional que representa el rendimiento esperado promedio durante la temporada de refrigeración (se expresa en términos de la producción de energía de refrigeración del dispositivo dividido por la entrada de energía al dispositivo), y de forma opcional la información básica del refrigerante (tipo, potencial de calentamiento global, cantidad utilizada, porcentaje de pérdidas anuales y el precio del refrigerante (ver Figura 3.14).

3.2.4 Energías renovables

Aunque el uso de energías renovables no es un sistema integrado en los edificios para su normal funcionamiento, se decidió evaluar el impacto de estas tecnologías en los ahorros energéticos. Para ello se utilizó una herramienta que evalúa el potencial del uso de sistemas fotovoltaicos. Skelion (<http://www.skelion.com/index.htm>) es un plugin de SketchUp (<http://www.sketchup.com/>) que permite diseñar sistemas solares fotovoltaicos o sistemas térmicos mediante la inserción de paneles solares en las diferentes estructuras. Skelion permite dibujar los paneles y hacer cálculos de energía. Es útil para el diseño de instalaciones residenciales o el montaje de plantas de energía que utilizan sus propios componentes.

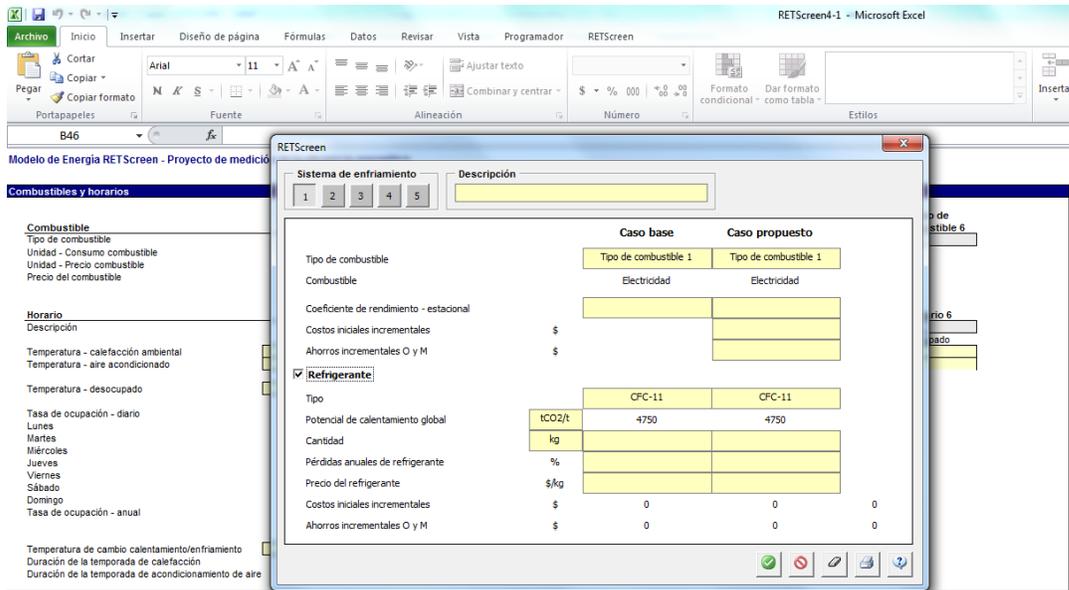


Figura 3.14. Ingreso de información en RETScreen (HVAC). Fuente: Autor

A pesar de que Skelion no es gratuito, tiene una versión de evaluación por tiempo limitado, después del cual se restringen algunas funciones, se decidió utilizarlo porque es una gran herramienta que entrega resultados de gran aplicación con conocimiento mínimo del proceso y porque la versión profesional tiene un costo bajo (U\$200 para una licencia) comparado con la facilidad de uso y los beneficios del cálculo. En primer lugar, se debe ubicar geográficamente el modelo con la ayuda de Google Maps, lo que permite obtener una foto satelital, la malla 3D de la superficie y sombras reales de la posición geográfica seleccionada para cualquier época del año. Posteriormente, se dibuja el edificio a través del modelado con SketchUp o importando planos 2D o 3D de otros programas como AutoCAD (ver Figura 3.15).

Una vez se identifica la superficie del edificio donde se planea ubicar los paneles fotovoltaicos, la herramienta permite determinar el área útil de la superficie evitando sombreados a lo largo de todo el año debido a obstáculos cercanos. Los paneles se insertan escogiendo de una amplia base de datos de fabricantes que entrega información como longitud, ancho, espesor, potencia y peso del panel. Igualmente, se deben establecer otros parámetros de los componentes del sistema fotovoltaico como distancia entre paneles, posición del panel (vertical u horizontal), espacio entre filas de paneles, alineación de filas, entre otros (ver Figura 3.16).

El cálculo de potencia entregada por el sistema fotovoltaico se puede determinar para un día en particular o dependiendo de separaciones entre paneles de tal forma

que no se den sombreado entre ellos mismos. Igualmente, se debe incluir la inclinación de los paneles respecto a la superficie sobre la cual descansan. Como resultado, la herramienta entrega la siguiente información: número de paneles a instalar, potencia suministrada por cada panel y potencia total del sistema y peso del sistema.

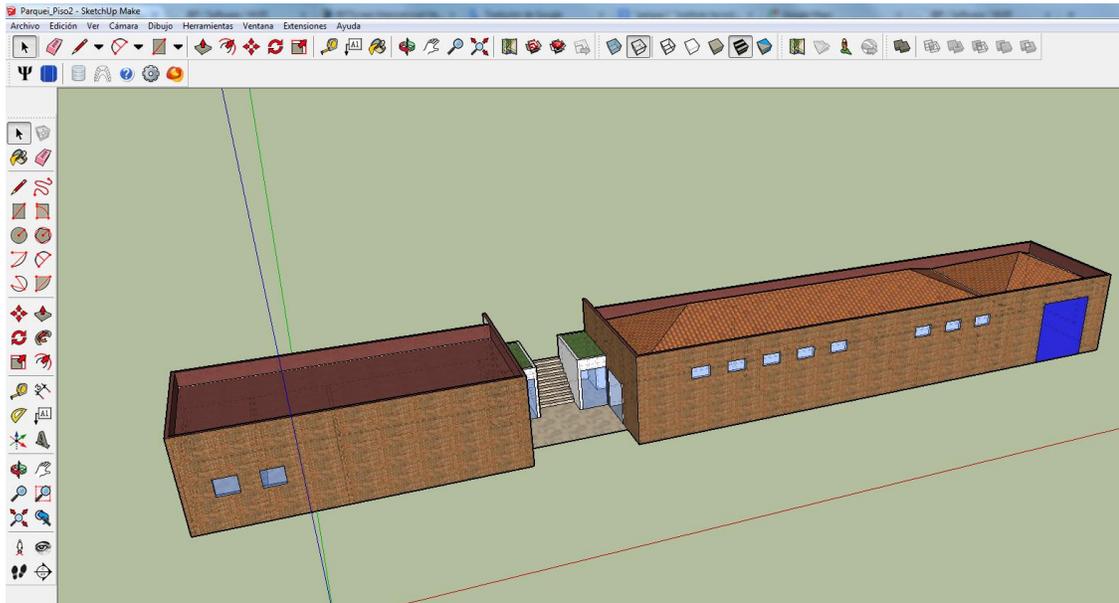


Figura 3.15. Modelado de edificio en SketchUp. Fuente: Autor

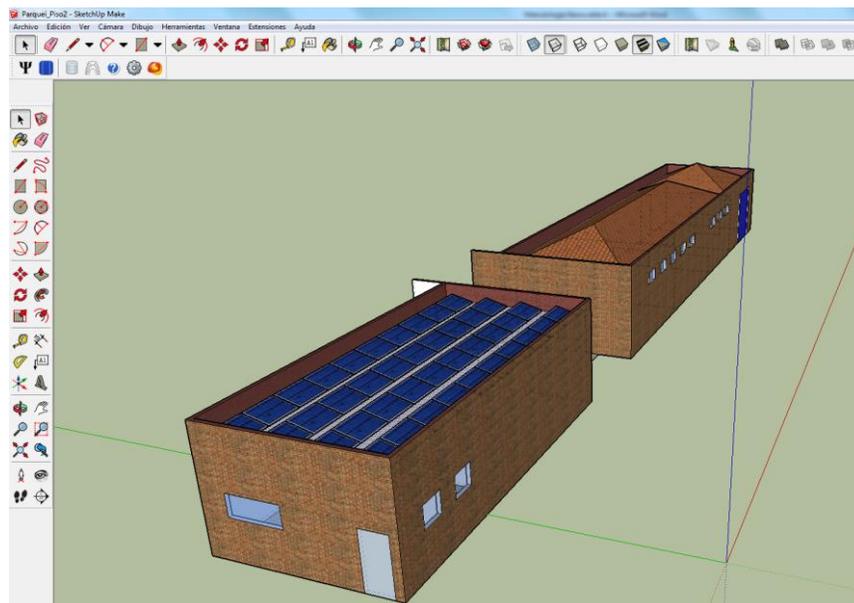


Figura 3.16. Ubicación de paneles con Skelion. Fuente: Autor

3.2.5 Obtención de costos

Para ayudar a la obtención de los costos que supone cada una de las adecuaciones en los sistemas descritos anteriormente, se utilizó el generador de precios de la construcción (<http://www.colombia.generadordeprecios.info/>). El Generador de precios es una herramienta que ayuda a obtener el coste real de un proyecto, ya que permite la obtención de costes de construcción ajustados al mercado. Además, facilita la elaboración de una documentación de calidad (completa, consistente y con información técnica vinculada a cada unidad de obra), útil para las distintas fases del ciclo de vida del edificio (estudios previos, anteproyecto, proyecto básico y de ejecución, dirección y ejecución de la obra, uso y mantenimiento, construcción y reciclado final). Incluye productos de fabricantes y productos genéricos.

El Generador de precios de la construcción de CYPE Ingenieros tiene en cuenta las características concretas de cada obra para generar precios específicos para el proyecto que se está presupuestando. Los precios tanto de materiales como de mano de obra y de maquinaria y los rendimientos de la mano de obra se calculan a partir de características de la obra de referencia, las cuales incluyen ubicación, superficie total construida, superficie de la planta tipo, número de plantas sobre rasante, número de plantas bajo rasante, accesibilidad, topografía, mercado, situación de la obra, tipo de edificio, distancia a vertedero autorizado y si la obra es nueva o rehabilitación (ver Figura 3.17).

Generador de precios de la construcción. Colombia. CYPE Ingenieros, S.A.

El Generador de precios es el camino más directo para llegar al coste real de su proyecto, ya que permite la obtención de costes de construcción ajustados al mercado. Además, facilita la elaboración de una documentación de calidad (completa, consistente y con información técnica vinculada a cada unidad de obra), útil para las distintas fases del ciclo de vida del edificio (estudios previos, anteproyecto, proyecto básico y de ejecución, dirección y ejecución de la obra, uso y mantenimiento, deconstrucción y reciclado final). Incluye productos de fabricantes y productos genéricos.

A diferencia de otros bancos de precios, el generador de precios de la construcción de CYPE Ingenieros tiene en cuenta las características concretas de cada obra para generar precios específicos para el proyecto que se está presupuestando.

Cambiar las características de la obra.

Si desea consultar el banco de precios y poder modificar para una obra las diferentes características y tipologías puede hacerlo [suscribiéndose gratuitamente aquí](#). De esta forma, podrá descargar la versión en CD o bien acceder a la parte privada del Generador de Precios, donde podrá almacenar y gestionar las características particulares de sus obras.

Las características de la obra de referencia para la cual se han publicado los precios unitarios, tanto de materiales como de mano de obra y de maquinaria y los rendimientos de la mano de obra en la versión de Internet son las siguientes:

- Superficie de la intervención : 850,00 m²
- Superficie de la planta tipo : 500,00 m²
- Número de plantas sobre rasante : 6
- Número de plantas bajo rasante : 1
- Dificultad de acceso : Limitado
- Almacenamiento de materiales y escombros : Reducido
- Transporte de materiales : Transporte manual
- Presencia de usuarios : Presencia ocasional
- Estado de conservación del edificio : Deficiente
- Grado de intervención : Parcial
- Dificultad de ejecución : Moderada
- Mercado : Crecimiento moderado
- Situación : Entre medianeras
- Tipo de vivienda : Plurifamiliares
- Distancia a vertedero autorizado : 50,00 km

Geometría de la planta :

Figura 3.17. Características de la obra con el generador de precios. Fuente: Autor

Una vez se ha incluido la información de la obra, se escoge el tipo de sistema que se va a intervenir, posteriormente el subsistema donde se hará la adecuación o montaje y por último el tipo de actividad para la cual se desea calcular el costo. Para cada actividad, la herramienta presenta una imagen del elemento seleccionado con opciones de su instalación en el edificio y de los elementos que lo constituyen. La herramienta entonces entrega el análisis detallado de los precios unitarios, de los costos de la mano de obra para ejecutar la actividad y el costo total del trabajo. Adicionalmente, entrega un pliego de condiciones de la actividad que se está analizando, donde se especifica claramente las condiciones técnicas, de soporte, ejecución, medición y pago de la actividad (ver Figura 3.18).

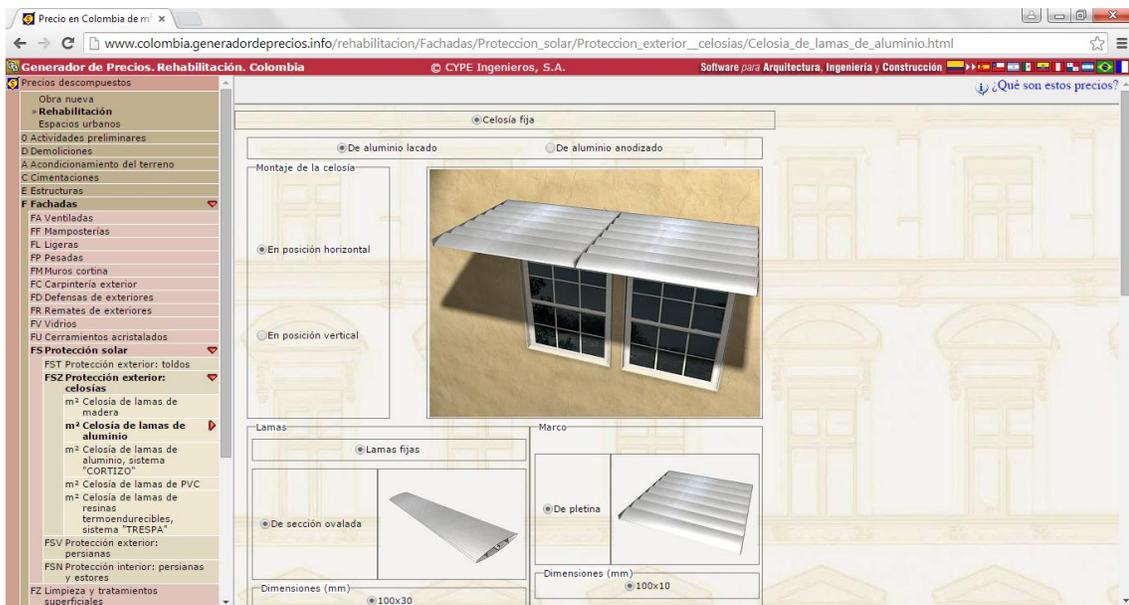


Figura 3.18. Información de la actividad con el generador de precios. Fuente: Autor

3.2.6 Evaluación económica

Para realizar la evaluación técnico-económica de las diferentes medidas de ahorro energético consideradas con las herramientas descritas anteriormente se utilizó el programa RETScreen. RETScreen (<http://www.etscreen.net/ang/home.php>) es un sistema software de gestión de energías limpias para el análisis de viabilidad técnica y financiera de proyectos de eficiencia energética, energías renovables y cogeneración, así como para el análisis del rendimiento energético operativo. Esta herramienta está basada en Excel y no se requiere de alguna experiencia para su uso. Está dirigida a ingenieros, arquitectos, administradores de instalaciones y educadores. Numerosos expertos han contribuido al desarrollo, pruebas y validación del RETScreen.

RETScreen puede evaluar la viabilidad de mejoras de eficiencia energética en una amplia gama de edificios residenciales, comerciales, institucionales e industriales. Es útil tanto para nuevas construcciones como para renovaciones. Para realizar un análisis exacto, se debe incluir la información básica del proyecto como el tipo de evaluación que se hará y el tipo de edificio. Adicionalmente, al escoger la ubicación del proyecto, la herramienta carga la información relativa a los datos meteorológicos de la ciudad: temperatura, humedad, radiación, presión atmosférica, etc. (ver Figura 3.19).

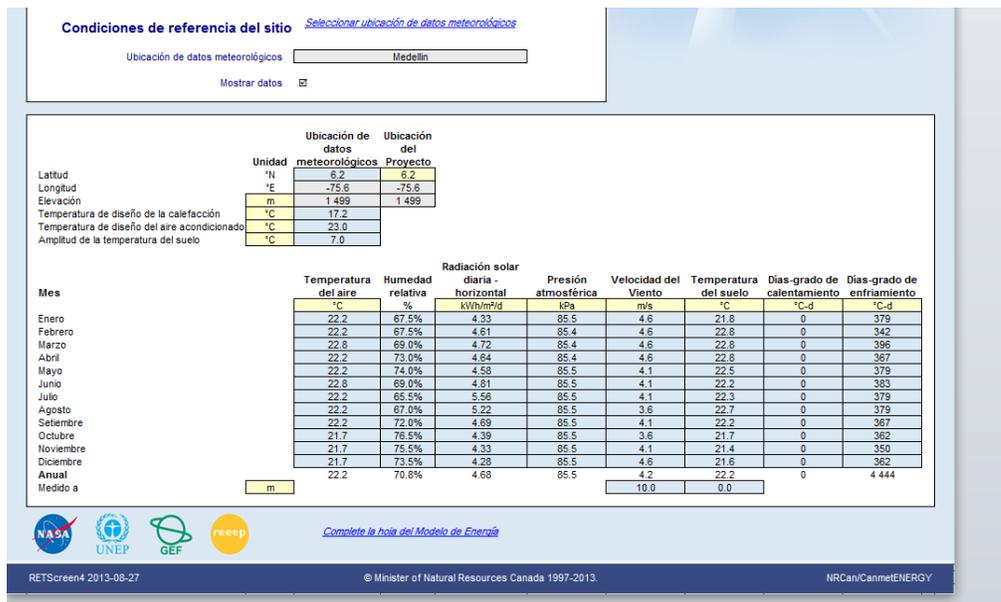


Figura 3.19. Información meteorológica en RETScreen. Fuente: Autor

Para todas las instalaciones, RETScreen permite comparar un caso propuesto contra un caso base en un análisis que consta de cinco pasos. Primero, se deben identificar los tipos de combustibles utilizados en el edificio y los costos asociados a ellos. También, se deben determinar los horarios de funcionamiento los cuales se utilizan en el cálculo de las cargas de calefacción y refrigeración que dependen del clima, es decir, las cargas debido a la envolvente del edificio y a la ventilación. En segundo lugar, se deben especificar las características de las instalaciones para el caso base y el caso propuesto junto con el costo incremental para cada medida del caso propuesto (ver Figura 3.20).

En tercer lugar, se debe garantizar la validez de las entradas mediante la evaluación del resumen de uso de energía y combustible. Si es posible, se deben verificar las estimaciones de RETScreen contra facturas de energía. En cuarto lugar, se pueden determinar las reducciones de emisiones del proyecto. Este paso

es opcional. Por último, se ingresan los parámetros financieros para que RETScreen pueda proporcionar un resumen de la viabilidad financiera del proyecto (ver Figura 3.21).

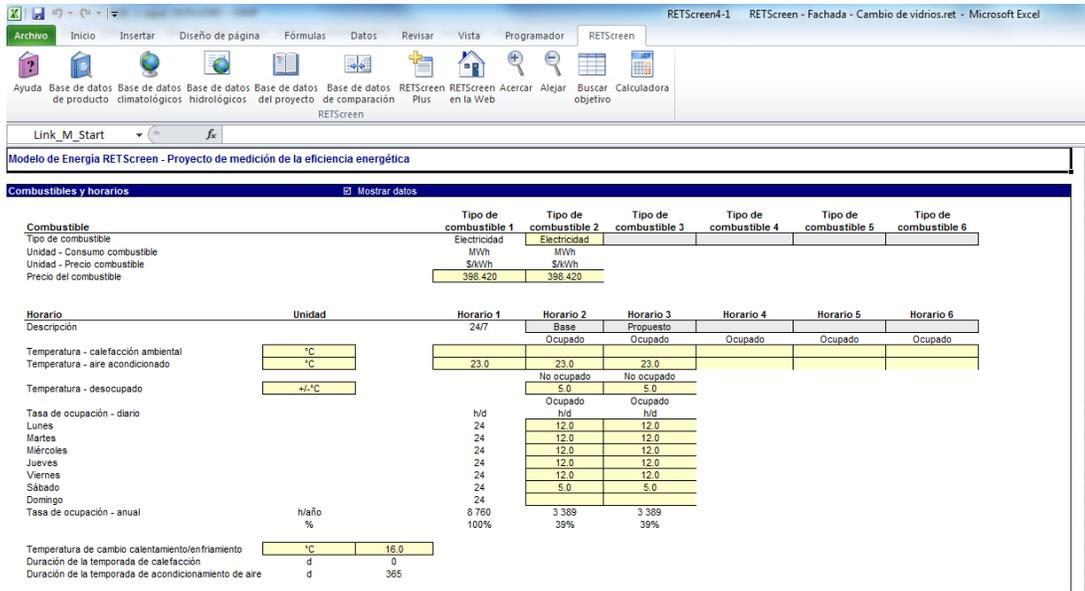


Figura 3.20. Información sobre combustibles y horarios en RETScreen. Fuente: Autor

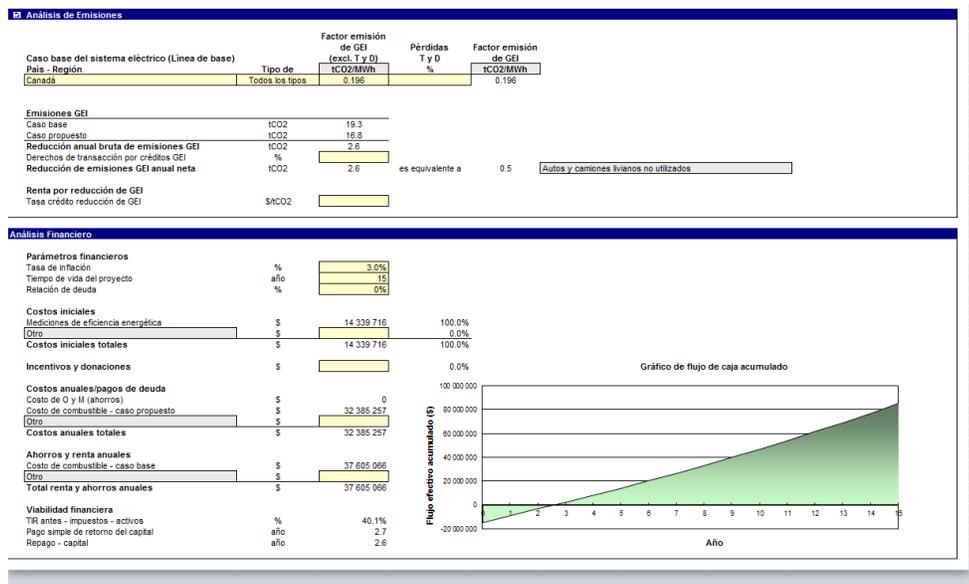


Figura 3.21. Análisis financiero en RETScreen. Fuente: Autor

A continuación, se describe la información que se debe incluir en RETScreen para cada uno de los sistemas que integran la metodología propuesta y que se toma de las diferentes herramientas que han sido seleccionadas para evaluar las medidas de ahorro energético. El rendimiento energético de un sistema de iluminación está

influenciado por un número de factores. Estos suelen incluir el nivel de iluminación requerido para el tipo de espacio que está siendo iluminado, el tipo de lámpara y la luminaria seleccionada, la eficiencia y la potencia para cada lámpara, el número total de lámparas instaladas y, por último, las horas de funcionamiento de las lámparas (ver Figura 3.22).

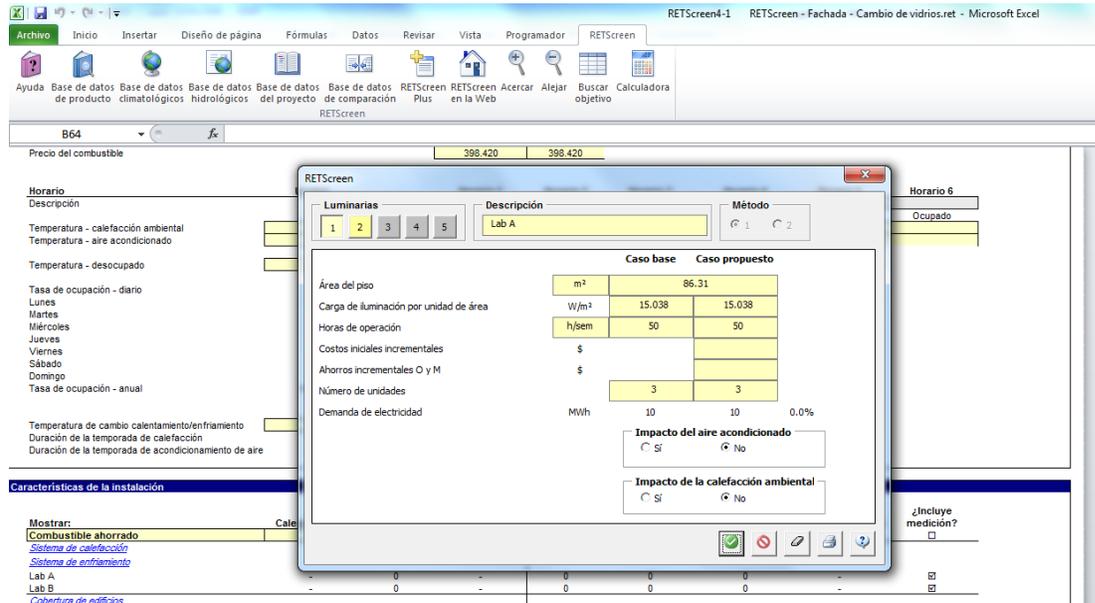


Figura 3.22. Información sobre iluminación en RETScreen. Fuente: Autor

En cuanto a la envolvente, el rendimiento energético de la envolvente del edificio depende de algunos factores que pueden incluir elementos de diseño, como la orientación física del edificio y la cantidad de luz solar que penetra en el interior o en los espacios de trabajo. Otros factores también pueden incluir las características de transferencia de calor (tanto las pérdidas y ganancias) y la ubicación de los componentes de la envolvente del edificio, incluyendo paredes, ventanas, puertas, pisos y techo. La eficiencia energética de un edificio también puede estar influenciada por cualquier infiltración de aire natural a través de la envolvente del edificio (ver Figura 3.23).

Para el sistema de HVAC, los principales factores que pueden afectar el rendimiento energético normalmente incluyen el tipo de combustible utilizado y el coeficiente estacional de rendimiento de los equipos de refrigeración. Otros factores también incluyen el tipo de refrigerante, la cantidad de refrigerante utilizado y las pérdidas anuales de refrigerante (ver sección 3.2.3).

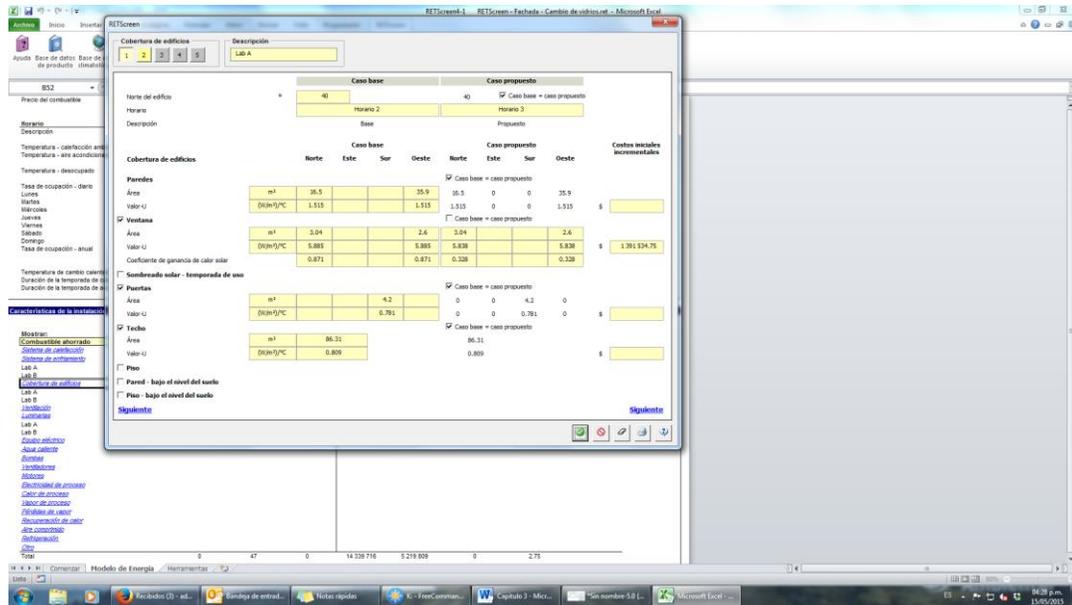


Figura 3.23. Información sobre fachada en RETScreen. Fuente: Autor

Los paneles fotovoltaicos producen electricidad a partir de energía solar. El rendimiento energético de un sistema fotovoltaico está influenciado por un número de factores. Por ejemplo, estos pueden incluir elementos climáticos y de diseño tales como la cantidad de radiación solar en el lugar del proyecto, el tipo de panel, potencia, área, eficiencia, temperatura nominal de la celda y el coeficiente de temperatura, así como el modo de seguimiento solar. Otros factores incluyen el uso de un inversor para transformar la salida de corriente continua a corriente alterna para sistemas que incluyen una conexión a la red o para sistemas aislados. Y la eficiencia energética de un sistema fuera de red también se verá influenciado por los días de autonomía de la batería, voltaje, eficiencia, capacidad, así como la eficiencia del controlador de carga (ver Figura 3.24).

3.3 Medidas de eficiencia energética evaluadas

La eficiencia energética significa la utilización de la cantidad mínima de energía en los diferentes sistemas que componen el edificio y que se requiere para mantener las condiciones de confort en su interior. La cantidad de energía que se consume varía en función del diseño de la estructura del edificio, de sus sistemas y de cómo se opera. Los sistemas de calefacción y refrigeración son los que consumen más energía en un edificio, sin embargo los controles, tales como termostatos programables y los sistemas de gestión de energía en edificios pueden reducir significativamente el uso de la energía de estos sistemas. Las oportunidades para reducir al mínimo las necesidades de energía mediante la eficiencia energética y

las energías renovables en los edificios comprenden el diseño de edificios, los materiales de construcción, la calefacción, la refrigeración, la iluminación y los equipos eléctricos. A continuación se describen las medidas implementadas en cada uno de los sistemas que integran la metodología.

The screenshot shows the RETScreen software interface. The main window displays the 'Sistema eléctrico de potencia del caso propuesto' section, which includes a table for photovoltaic system parameters:

Parámetro	Valor
Capacidad de generación eléctrica (KW)	13.23
Fabricante	Yingli Solar
Modelo	mono-Si - Panda - YL245C-30b
Factor de utilización (%)	12.0%
Electricidad exportada a la red (MWh)	13.9
Tarifa de exportación de electricidad (COP/MWh)	398 400.00

The 'Análisis de Emisiones' section shows the following data:

Caso base del sistema eléctrico (Línea de base)	Factor emisión de GEI (excl. T y D) (tCO2/MWh)	Pérdidas T y D (%)	Factor de conversión de GEI (tCO2/MWh)
País - Región			
Colombia	0.176	%	tCO2
Electricidad exportada a la red (MWh)	14	Pérdidas T y D	

The dialog box 'RETScreen' is open, showing the following configuration details:

- Sistema: Electricidad
- Tecnología: Fotovoltaico
- Tipo: mono-Si
- Fabricante: Yingli Solar
- Modelo: mono-Si - Panda - YL245C-30b
- Capacidad por unidad (W): 245
- Número de unidades: 54
- Capacidad (W): 13 230
- Eficiencia: 15 %
- Área de la estructura: 1.63 m²

Figura 3.24. Información sobre renovables en RETScreen. Fuente: Autor

En cuanto a iluminación, el aprovechamiento de la luz natural en lugar de usar sistemas de iluminación durante el día es una medida bien conocida de ahorro energético, pero se ignora cada vez más especialmente en modernos espacios de oficina con aire acondicionado. El diseño inadecuado de los sistemas de iluminación puede dar lugar al uso adicional de las luminarias durante el día lo que se refleja directamente en la cantidad de horas que se usa este sistema. La selección de luminarias y lámparas de alta eficiencia es otra medida potencial de ahorro de energía en el sistema de iluminación. Por ejemplo, las lámparas LED tienen un consumo muy bajo de potencia y una larga vida útil. Las medidas evaluadas en el sistema de iluminación fueron: la reducción del tiempo de uso de las lámparas (aprovechando la luz natural) y el reemplazo de las lámparas actuales por un sistema LED.

Los materiales que componen el envoltorio del edificio tienen un impacto significativo en la cantidad de energía requerida para mantener un ambiente adecuado dentro de una estructura. Los materiales de diferentes propiedades tienen diferentes conductividades térmicas. La energía necesaria para el enfriamiento depende principalmente de la transmisión de calor a través de la

envolvente del edificio y de los procesos internos en el edificio. Por ejemplo, las ventanas tienen el potencial de permitir una ganancia de calor excesiva. Para reducir la energía requerida para enfriar el edificio se evaluó: reemplazar las ventanas para reducir la ganancia solar, agregar un sombreado exterior (cortasol) y reducir las infiltraciones en ventanas y puertas.

El propósito de un sistema HVAC es suministrar calefacción, enfriamiento y ventilación a un edificio en un gran rango de condiciones ambientales específicas a la ubicación del edificio. El grado en el cual un sistema HVAC falla y por ejemplo enfría de más un espacio determina la cantidad de energía que se desperdicia. Para evitar esto, existen diferentes medidas de ahorro que se enfocan en la intervención del sistema. Ya que el sistema HVAC del edificio bajo estudio es nuevo, se evaluaron medidas de bajo costo que tenían que ver principalmente con la operación del mismo. Las medidas evaluadas fueron: ajustar el tiempo de funcionamiento del sistema HVAC al horario de ocupación del edificio y ajustar el control de temperatura de los espacios ya que se está enfriando de más el edificio.

El uso de sistemas fotovoltaicos en aplicaciones conectadas a la red permite entregar la energía eléctrica directamente a la red de energía eléctrica. Un ejemplo de una aplicación conectada a la red es la integración de sistemas fotovoltaicos a los edificios. Los beneficios de la generación de energía fotovoltaica conectada a la red se evalúan generalmente en su potencial para reducir los costos para el consumo de energía así como sus beneficios ambientales. Los fabricantes de sistemas fotovoltaicos están desarrollando paneles que se pueden incorporar en los edificios como componentes estándar de la envolvente lo que ayuda a reducir el costo relativo del sistema de energía fotovoltaica por el costo de los materiales de construcción convencionales. En este trabajo se evaluó el posible ahorro de energía debido a la implementación de un sistema fotovoltaico conectado en la red e instalado en el techo del edificio.

3.4 Validación de la metodología

Para validar la metodología, las diferentes medidas descritas en la sección anterior se evaluaron con la ayuda de las diferentes herramientas en el edificio Parque i del Instituto Tecnológico Metropolitano - ITM - sede Fraternidad, un edificio de tipo institucional. Parque i hace parte del sistema integrado de laboratorios científicos del ITM y cuenta con un área de aproximadamente 1.700 m² distribuidos en seis niveles (ver Figura 3.25). En los primeros cinco niveles se encuentran instalados laboratorios de diferentes áreas y en el sexto nivel se encuentran algunas oficinas

y un auditorio. Debido a la complejidad en la división de las diferentes áreas, se decidió tomar dos espacios como elementos representativos y evaluar en ellos las medidas de eficiencia.



Figura 3.25. Vista frontal de Parque i. Fuente: Autor

El primer espacio, el cual fue llamado Laboratorio A, consiste de un área de aproximadamente 85 m² y comprende los laboratorios ubicados hacia el norte del edificio, en total son tres espacios con características similares. El segundo espacio, llamado Laboratorio B, tiene un área mucho mayor (aproximadamente 170 m²) y consiste de los laboratorios ubicados hacia el sur del edificio. En total son cinco espacios con características similares (ver Figura 3.26). El edificio se encuentra en la ciudad de Medellín, Colombia y su geolocalización es 6,244580 latitud norte y 75,552081 longitud oeste.

El edificio utiliza electricidad como combustible para todos sus sistemas a un costo de 333,0 \$/kWh. Este valor se obtuvo de la tarifa a abril de 2015 de las Empresas Públicas de Medellín E.S.P. (EPM), la cual suministra la energía eléctrica al edificio, para un usuario oficial conectado al nivel II de tensión (http://www.epm.com.co/site/clientes_usuarios/Clientesyusuarios/Hogaresypersonas/Energ%C3%ADa/Tarifas.aspx). El horario base utilizado para el funcionamiento del sistema HVAC consta de 12 horas diarias de lunes a viernes (7:00 a.m. a 7:00 p.m.) y 5 horas el sábado (7:00 a.m. a 12:00 p.m.). La temperatura de ajuste para el aire acondicionado se definió en 23°C con una diferencia con la temperatura cuando el edificio está desocupado de +5°C. En cuanto a los parámetros

financieros, se estableció una tasa de inflación del 3%, la cual es el objetivo del Banco de la República de Colombia para el año 2015 y un tiempo de vida de los proyectos de 15 años para las medidas de eficiencia energética y de 25 años para la instalación de energías renovables. Igualmente, se definió la relación de deuda en 0%, lo que significa que la inversión de capital que se requiere para financiar cada una de las medidas es total, no hay endeudamiento por parte de la institución.

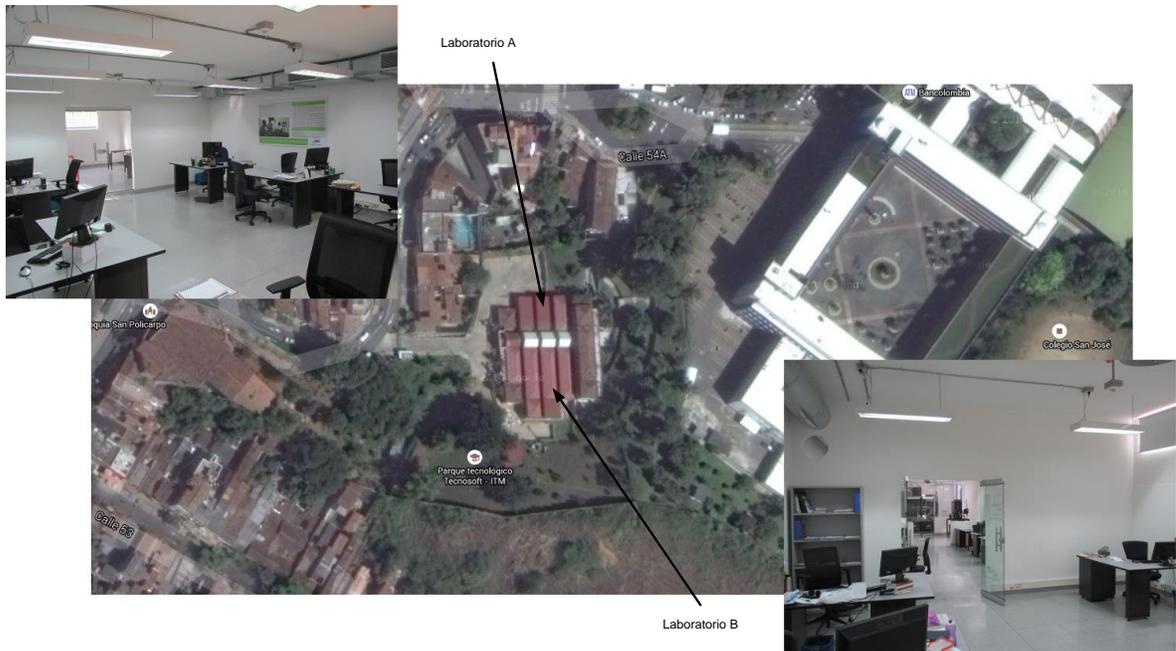


Figura 3.26. Visualización de los Laboratorios A y B. Fuente: Autor

Los laboratorios cuentan con luminarias Pocket Temporis con rejilla semiespecular y lámparas Osram T5 HO 54 W/865 SL, smartlux cool daylight. Los espacios tipo Laboratorio A cuentan con 11 lámparas con una potencia total de 1.298 W para una carga por unidad de área de 15,038 W/m². Los espacios tipo Laboratorio B tienen 22 lámparas con una potencia total de 2.596 W para una carga por unidad de área de 15,149 W/m². En ambos espacios el sistema de iluminación se utiliza en promedio 50 horas a la semana (10 horas diarias de lunes a viernes).

En cuanto a la envolvente, se consideró que la cara norte del edificio está alineada con el norte verdadero y que los parámetros de conductancia efectiva de cada uno de los componentes de la envolvente son los mostrados en las Tablas 3.2 y 3.3. Esta información fue obtenida a partir de las herramientas WUFI y WINDOW para las composiciones básicas de paredes y con un vidrio básico. Adicionalmente, las ventanas tienen un coeficiente de ganancia de calor solar de 0,871. En cuanto a la infiltración de aire natural, se consideró en cuanto a la permeabilidad de los

elementos que las paredes estaban ajustadas, las puertas tenían fugas y las ventanas término medio (ver Figura 3.27).

Tabla 3.2. Área y valor U para los componentes del Laboratorio A. Fuente: Autor

	Norte		Este		Sur		Oeste	
	Área (m ²)	Valor U (W/m ² /°C)	Área (m ²)	Valor U (W/m ² /°C)	Área (m ²)	Valor U (W/m ² /°C)	Área (m ²)	Valor U (W/m ² /°C)
Paredes	16,50	1,515	35,90	1,515	16,50	1,515	35,90	1,515
Ventana	3,04	5,885	---	---	---	---	2,06	5,885
Puertas	---	---	---	---	4,2	0,781	---	---
Techo	86,31	0,809						

Tabla 3.3. Área y valor U para los componentes del Laboratorio B. Fuente: Autor

	Norte		Este		Sur		Oeste	
	Área (m ²)	Valor U (W/m ² /°C)	Área (m ²)	Valor U (W/m ² /°C)	Área (m ²)	Valor U (W/m ² /°C)	Área (m ²)	Valor U (W/m ² /°C)
Paredes	21,50	1,515	93,30	1,515	21,50	1,515	93,30	1,515
Ventana	---	---	---	---	4,16	5,885	4,08	5,885
Puertas	4,20	0,781	---	---	---	---	---	---
Techo	171,50	0,809						



Figura 3.27. Infiltraciones en puertas y ventanas. Fuente: Autor

Por último, para el sistema HVAC se tomó de placa un coeficiente de rendimiento estacional de 2,06 con el uso de 19,5 kg del refrigerante HFC-410A. Se consideraron unas pérdidas anuales del refrigerante del 1% con un costo de \$26.000 por kilogramo.

En cuanto al generador de precios, la configuración del edificio se ajustó como una rehabilitación en Medellín, con una superficie total construida de 1.700 m², una superficie de planta tipo de 300 m² y seis plantas sobre rasante. Se consideró que la obra no tiene dificultad en cuanto al acceso, que hay un almacenamiento reducido de materiales y escombros, que no hay dificultad en el transporte de materiales y que el grado de intervención de cada técnica de ahorro es puntual. Igualmente, se estableció que el grado de conservación del edificio es bueno, que la dificultad de ejecución de las obras son mínimas, que hay una presencia permanente de usuarios y que la distancia al vertedero más cercano es de aproximadamente 50 km.

Adicionalmente, a la evaluación de los ahorros en dinero que se podrían obtener con las diferentes medidas de eficiencia energética en el edificio, también se evaluarán las posibles reducciones en emisiones de gases contaminantes. Para esto, se utilizó como factor de emisiones un valor de 0,2 tCO₂/MWh, el cual fue obtenido del informe mensual de variables de generación y del mercado eléctrico colombiano a enero de 2015 (<http://www.siel.gov.co>).

4. Resultados y discusión

Los cambios sociales y ambientales han incrementado el enfoque en la conservación de los recursos naturales y la vida sostenible. Los recientes cambios económicos también han causado que los consumidores reevalúen la forma cómo utilizan la energía, prestando mayor atención al aumento de la eficiencia. El empleo de mejores métodos de construcción en obra nueva como en rehabilitación podría reducir la cantidad de energía consumida, ahorrando así dinero y reduciendo el crecimiento de la carga eléctrica y de las emisiones a la atmósfera como resultado de la generación de electricidad. Sin embargo, en la rehabilitación de edificios no es posible definir un único paquete de medidas aplicables a todos los edificios existentes, ya que depende de las características originales de partida del edificio, de las particularidades constructivas, del tipo de instalación y de la zona climática donde se ubique.

El consumo energético en un edificio de oficinas está repartido en su mayoría entre los equipos de iluminación y el resto de los aparatos eléctricos, seguido de los sistemas de climatización, dedicándose una pequeña parte (alrededor del 5%) a la producción de agua caliente sanitaria. El uso generalizado de los sistemas de climatización, los sistemas de iluminación o el cada vez mayor número de equipos ofimáticos contribuyen significativamente a aumentar el consumo de energía de los centros de trabajo. Este consumo se ve influido también por factores como el nivel de eficiencia energética de los equipos, los hábitos de consumo de los usuarios o las propias características constructivas del edificio.

Los avances tecnológicos ayudan a que los edificios sean más eficientes y proporcionan acceso a nuevas fuentes de energía. Sin embargo, hay una serie de factores que pueden mejorar la eficiencia de los edificios sin inversión o investigación significativa, incluyendo el uso más generalizado de las prácticas integradas de diseño, estrategias de reducción de uso de energía, un incremento en las políticas energéticas a nivel de gobierno, y una mejor operación y mantenimiento de los edificios existentes. A continuación, se presentan los resultados de la evaluación de diferentes medidas de eficiencia energética en el edificio.

4.1 Iluminación

La iluminación supone uno de los principales puntos de consumo energético de un edificio, 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 del edificio a través de la energía disipada por las lámparas en forma de calor, lo cual contribuye a aumentar las temperaturas interiores y, por lo tanto, a incrementar las necesidades de refrigeración.

Siempre que se pueda hay que tratar de sacar el máximo partido a la luz natural en el puesto de trabajo. La luz del sol, además de ser gratuita, es la forma de iluminación natural más limpia y barata que existe y sumamente beneficiosa para la salud. Ninguna luz artificial puede sustituir a la natural, y por eso es altamente recomendable utilizarla al máximo siempre que se pueda. Sin embargo, hay que prestar atención también a los posibles deslumbramientos que puedan resultar molestos. En las instalaciones de Parque i se han instalado blackout en las ventanas del lado oeste para evitar deslumbramientos especialmente en horas de la tarde, sin embargo, los blackout siempre permanecen desenrollados lo que impide el aprovechamiento de la luz natural durante la mañana. La primera medida consiste en aprovechar al máximo la luz natural, disminuyendo el uso de las luminarias a unas 30 horas a la semana (6 horas diarias de lunes a viernes). Esta medida no tiene costo alguno ya que solo se deben enrollar los blackout en las mañanas. En la Figura 4.1 se muestra el flujo de caja acumulado por el cambio en el uso del sistema de iluminación.

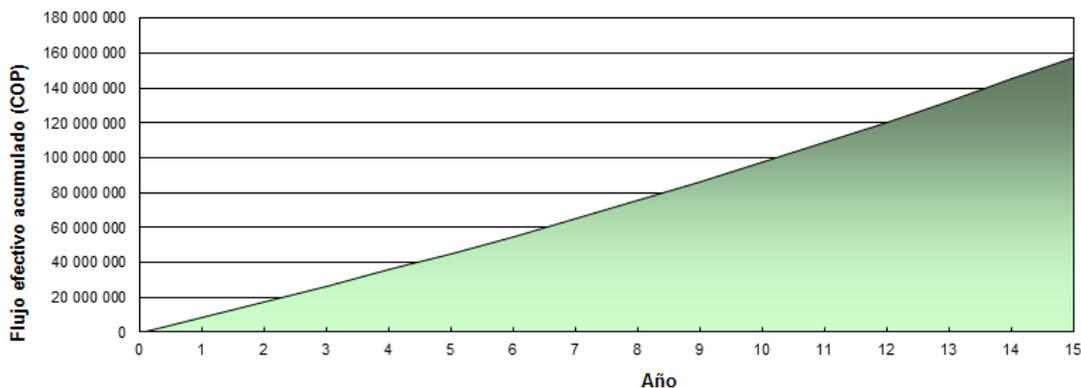


Figura 4.1. Flujo de caja acumulado por el cambio en el uso del sistema de iluminación. Fuente: Autor

Esta medida generaría un ahorro anual de 32,26 MWh lo que corresponde al 14,96% de la energía consumida por el sistema. Igualmente, se produciría un

ahorro anual de \$8.230.084 y ya que la inversión es nula, el tiempo de retorno es inmediato. Por otro lado, con este ahorro energético se dejarían de emitir 4,9 tCO₂ al año. Esta es una medida de costo nulo aunque requiere de la participación e implicación de todo el personal afectado por la medida.

Otro aspecto que incide directamente sobre el consumo en iluminación es el tipo de lámpara utilizado. Actualmente en el mercado existen distintos tipos de lámparas de bajo consumo con elevados índices de eficiencia luminosa, que permiten cubrir las necesidades de iluminación adecuadas a cada zona de trabajo con un consumo de energía apropiado para cada aplicación. En cualquier caso, habrá que cuidar siempre que en cada zona del edificio exista un nivel de iluminación suficiente, confortable y adecuada para crear un ambiente de trabajo agradable para los usuarios de las instalaciones y asegurar el cumplimiento de las condiciones de calidad y confort visual. Para evaluar la incidencia del reemplazo de las lámparas actuales por un sistema de alta eficiencia (LED), se utilizó la herramienta DIALux evo. En primer lugar, se modelaron los dos espacios representativos (Figura 4.2) con las luminarias actuales para identificar los niveles existentes de iluminancia (Figura 4.3).



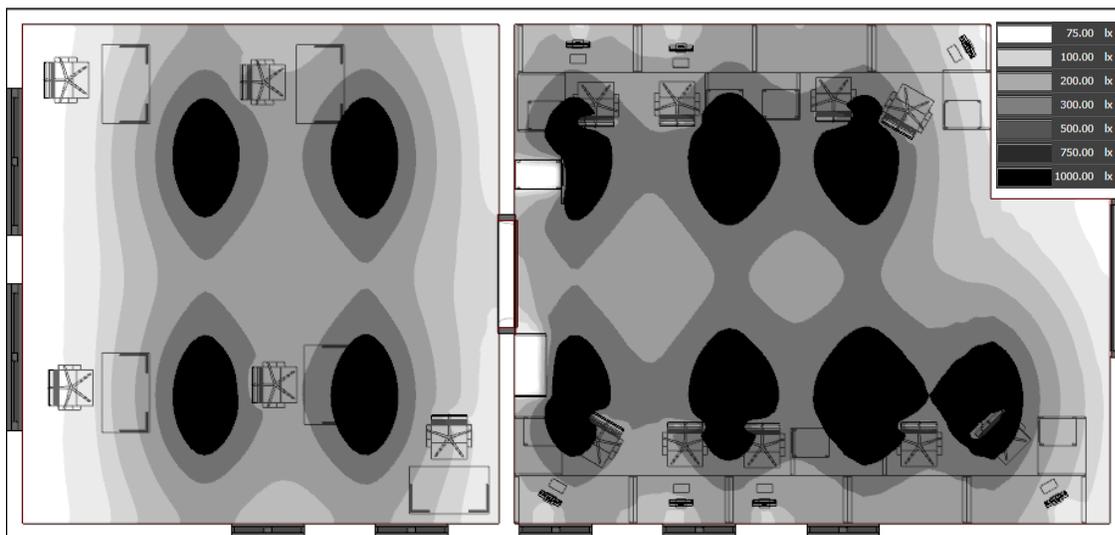
a)



b)

Figura 4.2. Modelo implementado en DIALux evo del a) Laboratorio A y b) Laboratorio B. Fuente: Autor

Posteriormente, se evaluó el reemplazo de las luminarias actuales por luminarias LED Luxycon-Santinno 8x9 W de 8.800 lúmenes con lámparas 288 tipo Warm White. La ubicación y cantidad de las luminarias fue definida por la herramienta con el fin de obtener una iluminancia promedio de 500 luxes en el área de trabajo. Este valor es el nivel promedio definido en el RETILAP para oficinas de tipo general (<http://www.minminas.gov.co/retilap#>).



a)



b)

Figura 4.3. Iluminancia con lámparas actuales en a) Laboratorio A y b) puestos de trabajo del Laboratorio B. Fuente: Autor

En la Figura 4.4 se muestran los niveles de iluminancia para los dos espacios representativos con las luminarias tipo LED. Con estas nuevas luminarias, la potencia total en el espacio tipo Laboratorio A se redujo en un 38,4% a 800 W con una carga por unidad de área de 9,27 W/m² y una iluminancia promedio de 607 lx. En el espacio tipo Laboratorio B, la potencia se redujo 47,6% a 1.360 W con una carga por unidad de área de 7,94 W/m² y una iluminancia promedio de 600 lx.



a)

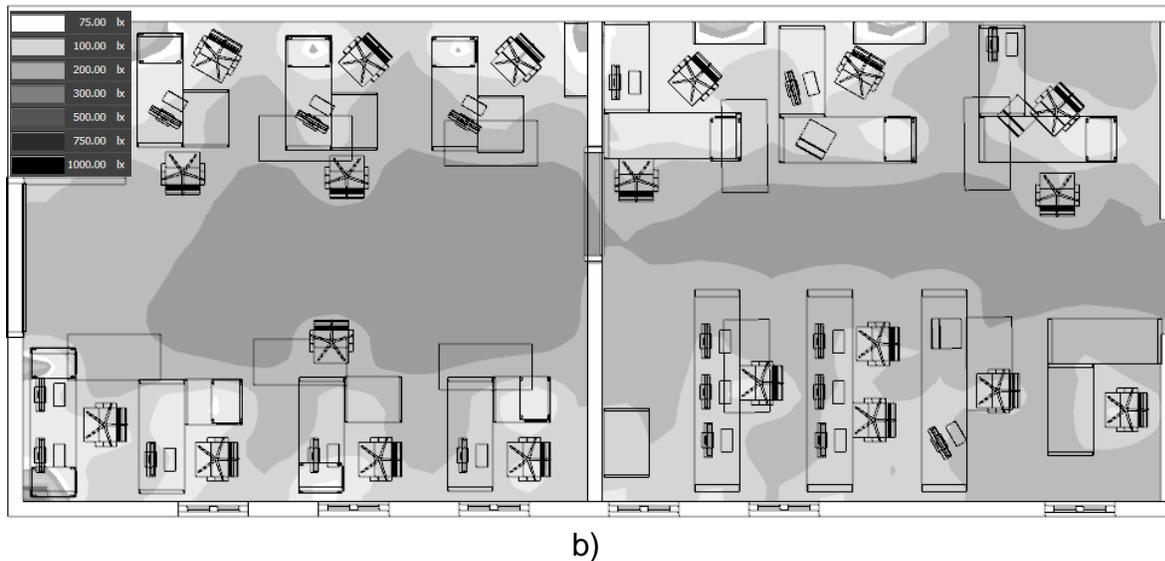


Figura 4.4. Iluminancia con lámparas tipo LED en a) Laboratorio A y b) puestos de trabajo del Laboratorio B. Fuente: Autor

La instalación de estas luminarias tiene un costo por unidad de \$516.354,22 obtenido con la ayuda del generador de precios, e incluye el costo de la luminaria, el material auxiliar y el tiempo de un maestro y un ayudante electricista. Con esta información, se hizo el análisis financiero arrojando un ahorro anual de 36,66 MWh lo que corresponde al 17,01% de la energía consumida por el sistema de iluminación. Igualmente, se produciría un ahorro anual de \$9.352.890 con una inversión inicial de \$59.380.731 lo que daría un tiempo de retorno de 5,7 años (ver Figura 4.5). Por otro lado, con este ahorro energético se dejarían de emitir 5,6 tCO₂ al año.

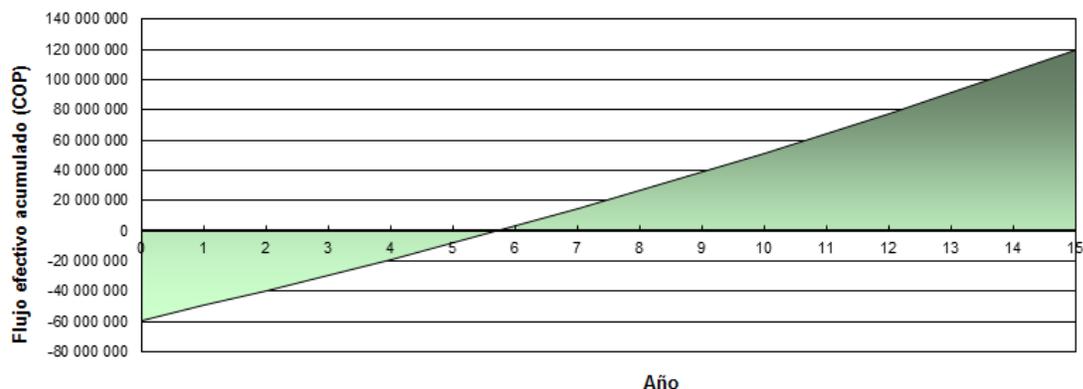


Figura 4.5. Flujo de caja acumulado por el cambio de luminarias. Fuente: Autor

Al evaluar la implementación de las dos medidas anteriores en conjunto, cambio en el uso del sistema de iluminación y cambio de luminarias, se encontró que con

la misma inversión inicial de \$59.380.731 se podría obtener un ahorro anual de \$13.841.818 lo que daría un tiempo de retorno de 4,0 años (ver Figura 4.6). Estas medidas arrojarían un ahorro anual de 54,26 MWh lo que corresponde al 25,17% de la energía consumida por el sistema de iluminación. Igualmente, se dejarían de emitir 8,3 tCO₂ al año.

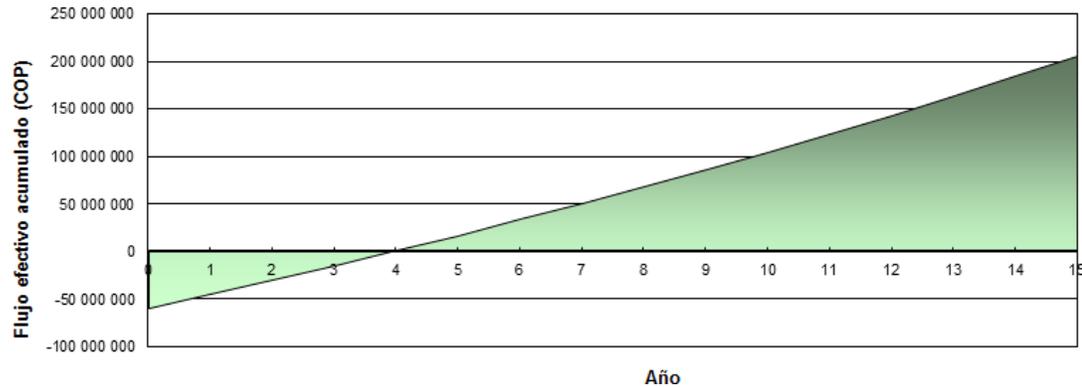


Figura 4.6. Flujo de caja acumulado por el cambio en el uso del sistema de iluminación y de luminarias. Fuente: Autor

4.2 Envoltente

La energía demandada por los sistemas de aire acondicionado de un edificio depende de muchos factores: la zona climática donde se encuentre el edificio, su calidad constructiva, nivel de aislamiento, eficiencia de las instalaciones y el uso que el personal haga de las mismas. El primer paso para disminuir los consumos de energía en climatización consiste en mejorar el aislamiento del edificio, para evitar las pérdidas y ganancias gratuitas de calor. La cantidad de calor necesaria para mantener una temperatura óptima y confortable en el interior del edificio está íntimamente ligada a su nivel de aislamiento térmico.

Se debe prestar atención especial a las características térmicas de los vidrios, ya que una tercera parte del gasto energético en refrigeración se debe a las pérdidas de calor que se producen a través de ventanas mal aisladas o de mala calidad energética. Las ventanas con vidrios sencillos son las más ineficientes y las que ofrecen mayores pérdidas de energía. Una solución es sustituirlas por sistemas de doble ventana, mejorar las propiedades térmicas del vidrio, o colocar láminas o filtros solares para mejorar las características térmicas.

Como medida de ahorro energético se evaluó el reemplazo de los vidrios comunes actuales por vidrios tipo COOL-LITE ST 4 mm de Saint Gobain. Este es un vidrio

con capa magnetrónica, de control solar, lo que permite un ahorro energético y el uso más económico de aire acondicionado y mejora de “confort visual” al reducir el deslumbramiento. Este vidrio tiene un factor U de 5,838 W/m²K y un coeficiente de ganancia de calor solar de 0,328 de acuerdo con la herramienta WINDOW. El costo de instalación de este vidrio es de \$210.422,13 por m², que incluye además del vidrio, el material auxiliar para la colocación de los vidrios y el tiempo de un oficial y un ayudante cristallero.

Esta medida generaría un ahorro anual de 25,63 MWh lo que corresponde al 14,33% de la energía consumida por el sistema de enfriamiento. Igualmente, se produciría un ahorro anual de \$4.143.545 a partir de una inversión inicial de \$11.888.846, por lo que el tiempo de retorno sería de 2,7 años (ver Figura 4.7). Por otro lado, con este ahorro energético se dejarían de emitir 2,7 tCO₂ al año.

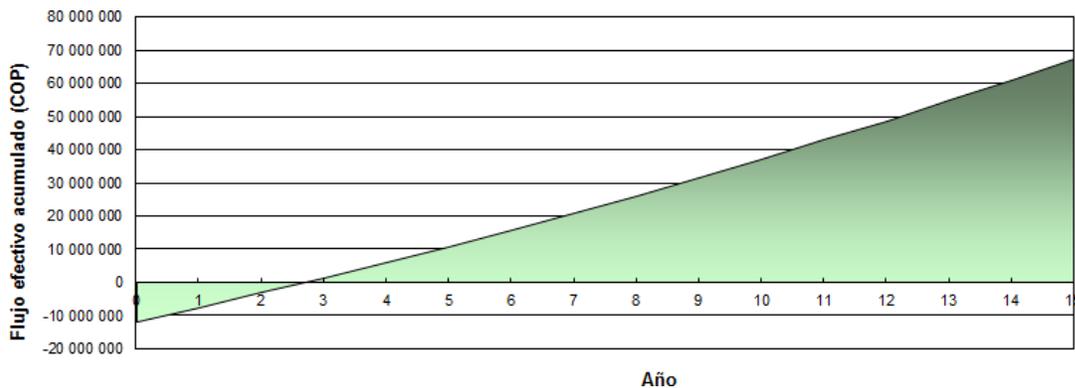


Figura 4.7. Flujo de caja acumulado por el cambio de vidrios. Fuente: Autor

Otra medida de ahorro energético que involucra la envolvente del edificio corresponde a la reducción de las ganancias térmicas utilizando “obstáculos” que ayuden a reducir y controlar la cantidad de radiación solar que entra a través de las superficies acristaladas del edificio (o lo que es lo mismo, disminuir las ganancias solares), manteniendo el confort de iluminación en el interior e intentando que el aprovechamiento de la iluminación natural sea el mayor posible. Existen distintas posibilidades como voladizos en fachadas, lamas fijas o móviles, toldos y persianas.

En esta medida se evaluó la instalación de un elemento de sombreado sobre el área de las ventanas de los dos espacios representativos, el cortasol exterior de aluminio Metalbrise de Hunter Douglas. Este cortasol está compuesto por un conjunto de paneles metálicos unidos entre sí que permite un movimiento giratorio sincronizado de los paneles, con el fin de regular el paso de la luz y la visión (ver Figura 4.8).



Figura 4.8. Imagen del cortasol Metalbrise de Hunter Douglas. Fuente: <http://rowcast.com/metalbrise>

Al ubicar este cortasol, las propiedades térmicas del sistema de acristalamiento cambian a un factor U de $3,375 \text{ W/m}^2\text{K}$ y un coeficiente de ganancia de calor solar de $0,362$. Este sistema tiene un costo de instalación de $\$613.000$ por m^2 . Con esta información, se hizo el análisis financiero arrojando un ahorro anual de $27,13 \text{ MWh}$ lo que corresponde al $15,16\%$ de la energía consumida por el sistema de enfriamiento. Igualmente, se produciría un ahorro anual de $\$4.385.952$ con una inversión inicial de $\$94.648.500$ lo que daría un tiempo de retorno de $16,5$ años (ver Figura 4.9) por encima del tiempo de vida esperado del proyecto de 15 años. Por otro lado, con este ahorro energético se dejarían de emitir $2,6 \text{ tCO}_2$ al año.

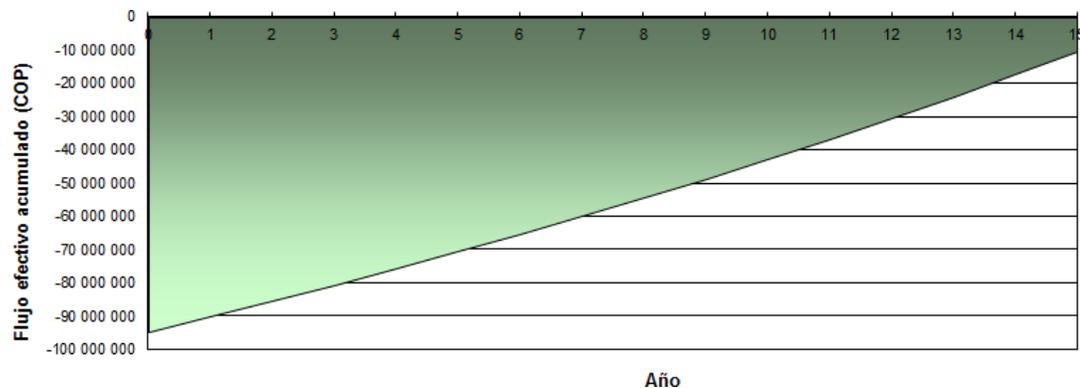


Figura 4.9. Flujo de caja acumulado por la inclusión del cortasol. Fuente: Autor

Una última medida evaluada en la envolvente del edificio fue la reducción de infiltraciones en puertas y ventanas. Para tapan las rendijas y disminuir las infiltraciones de aire que se pueden producir por las puertas y ventanas del edificio, 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). Son muy fáciles de colocar y muy baratos. Las puertas de cristal tienen que tomar en consideración los mismos factores que se han descrito antes para las ventanas. Los marcos deberían también ser tenidos en cuenta, como en el caso de las ventanas.

Esta medida consistió en evaluar la reparación de infiltraciones (sellado) en las ventanas y puertas de los espacios representativos con molduras plásticas, adheridas con silicona transparente, considerando un 5% de ranuras alrededor de la superficie de las ventanas y puertas. Esta medida tiene un costo de \$85.000 por m² considerando materiales y mano de obra. De esta forma se espera que la permeabilidad de los elementos cambie a ajustada tanto en paredes, como en puertas y ventanas.

Esta medida generaría un ahorro anual de 6,06 MWh lo que corresponde al 3,39% de la energía consumida por el sistema de enfriamiento. Igualmente, se produciría un ahorro anual de \$979.513 a partir de una inversión inicial de \$6.392.000, por lo que el tiempo de retorno sería de 5,9 años (ver Figura 4.10). Por otro lado, con este ahorro energético se dejarían de emitir 0,6 tCO₂ al año.

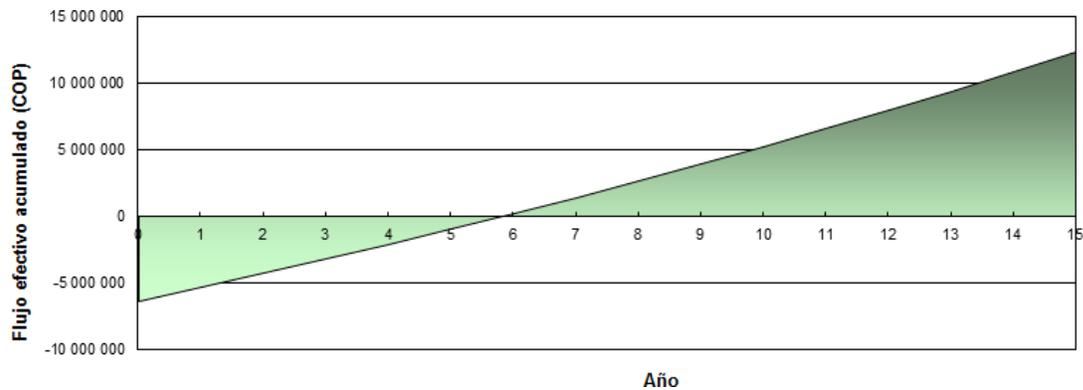


Figura 4.10. Flujo de caja acumulado por el arreglo de infiltraciones. Fuente: Autor

Al evaluar la implementación de las dos medidas en conjunto en la envolvente del edificio cuyo tiempo de retorno es inferior al tiempo de vida del proyecto, cambio en los vidrios y arreglo de infiltraciones, se encontró que con una inversión inicial de \$18.280.846 se podría obtener un ahorro anual de \$5.123.058 lo que daría un tiempo de retorno de 3,3 años (ver Figura 4.11). Estas medidas arrojarían un ahorro anual de 31,69 MWh lo que corresponde al 17,71% de la energía consumida por el sistema de enfriamiento. Igualmente, se dejarían de emitir 3,1 tCO₂ al año.

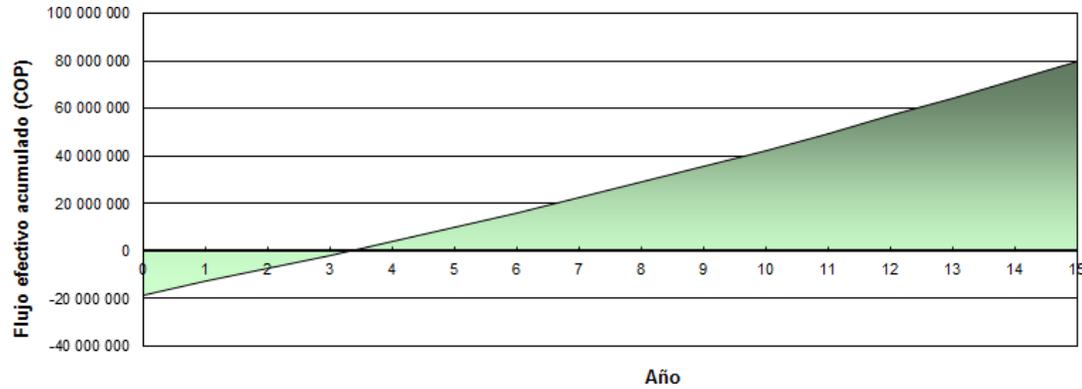


Figura 4.11. Flujo de caja acumulado por el cambio de vidrios y arreglo de infiltraciones. Fuente: Autor

4.3 HVAC

La presencia de sistemas de refrigeración en los edificios de oficinas es un hecho cada vez más frecuente y al mismo tiempo preocupante, dado que muchas de estas instalaciones presentan unos consumos de energía generalmente excesivos. En cuanto al control del sistema, es importante verificar el correcto funcionamiento de los temporizadores, para que funcionen según el nivel de ocupación del edificio. Es conveniente utilizar sistemas de regulación de la temperatura, mediante los cuales se podrá controlar de forma automática el funcionamiento del sistema de enfriamiento, según la demanda de frío existente en cada momento y en cada zona del edificio.

La primera medida de eficiencia energética aplicada al sistema HVAC consistió en mejorar el uso de este recurso, disminuyendo el tiempo de funcionamiento del sistema de aire acondicionado. La unidad manejadora de aire de cada espacio es encendida todos los días a las 7:00 a.m. y apagada a las 7:00 p.m. así no haya personas dentro de los espacios. Igualmente, la unidad es encendida los días sábados de 7:00 a.m. a 12:00 p.m. Se plantea que la unidad solo esté encendida cuando haya personas dentro de los espacios, es decir 10 horas diarias de lunes a viernes (8:00 a.m. a 6:00 p.m.). Los días sábado no se encendería.

Esta medida generaría un ahorro anual de 9,89 MWh lo que corresponde al 5,53% de la energía consumida por el sistema de enfriamiento. Igualmente, se produciría un ahorro anual de \$1.598.629 y ya que no es necesaria ninguna inversión, el tiempo de retorno es inmediato (ver Figura 4.12). Por otro lado, con este ahorro energético se dejarían de emitir 1,0 tCO₂ al año. Esta es una medida de costo nulo

aunque requiere de la participación e implicación del personal encargado del sistema.

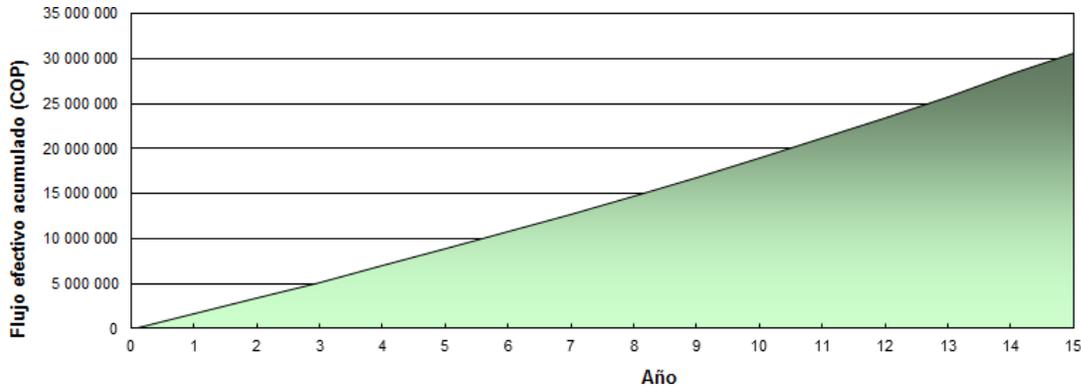


Figura 4.12. Flujo de caja acumulado por el cambio de horario en el sistema HVAC. Fuente: Autor

Los termostatos sirven para hacer un control individualizado de los equipos de refrigeración en función de la temperatura de cada recinto, parando dichos equipos cuando se alcanza la temperatura deseada. Sin embargo, si el termostato no está bien ajustado o ubicado, el sistema de enfriamiento podría trabajar de más y sobre enfriar el espacio. En los espacios representativos del edificio Parque i, los termostatos y el sistema de control de las unidades manejadoras de aire se encuentran por fuera del recinto que enfrían. Esto implica que el termostato está tomando como temperatura de control un valor diferente al real dentro del espacio lo que está generando un sobre enfriamiento de aproximadamente 2°C.

La reubicación del termostato tiene un costo de aproximadamente \$1.000.000 para el espacio tipo Laboratorio A y \$1.500.000 para el espacio tipo Laboratorio B. Con esta información, se hizo el análisis financiero arrojando un ahorro anual de 18,16 MWh lo que corresponde al 9,22% de la energía consumida por el sistema de enfriamiento. Igualmente, se produciría un ahorro anual de \$2.936.213 con una inversión inicial de \$10.500.000 lo que daría un tiempo de retorno de 3,3 años (ver Figura 4.13). Por otro lado, con este ahorro energético se dejarían de emitir 1,8 tCO₂ al año.

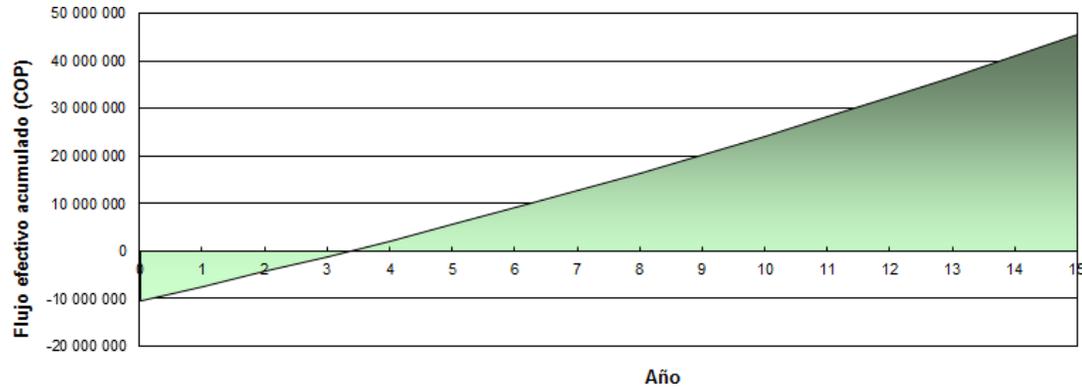


Figura 4.13. Flujo de caja acumulado por la reubicación del termostato en el sistema HVAC. Fuente: Autor

Al evaluar la implementación de las dos medidas anteriores en conjunto, cambio en el uso del sistema de enfriamiento y reubicación del termostato, se encontró que con la misma inversión inicial de \$10.500.000 se podría obtener un ahorro anual de \$4.534.842 lo que daría un tiempo de retorno de 2,2 años (ver Figura 4.14). Estas medidas arrojarían un ahorro anual de 28,05 MWh lo que corresponde al 14,23% de la energía consumida por el sistema de enfriamiento. Igualmente, se dejarían de emitir 2,7 tCO₂ al año.

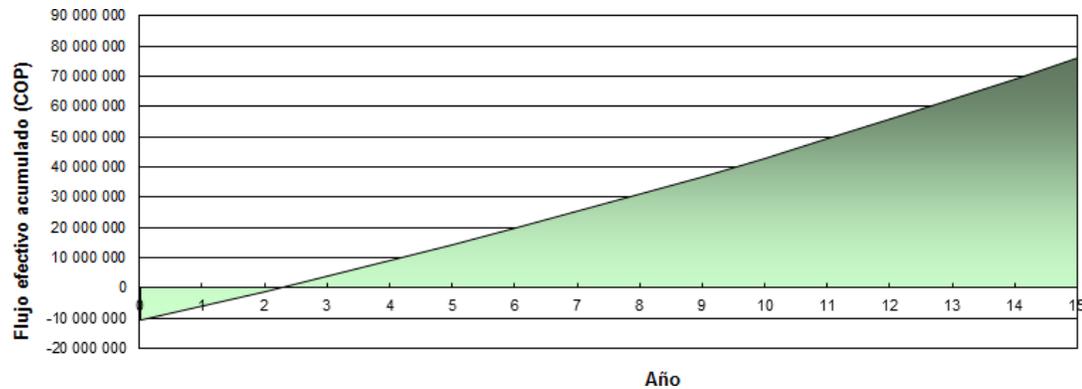


Figura 4.14. Flujo de caja acumulado por el cambio de horario y temperatura en el sistema HVAC. Fuente: Autor

Al evaluar la implementación de todas las medidas descritas anteriormente (excepto la inclusión del cortasol cuyo tiempo de retorno fue superior al tiempo de vida del proyecto), se encontró que con una inversión inicial de \$88.161.577 se podría obtener un ahorro anual de \$23.395.566 lo que daría un tiempo de retorno de 3,5 años (ver Figura 4.15). Estas medidas arrojarían un ahorro anual de 113,36 MWh lo que corresponde al 48,50% de la energía consumida por los sistemas de iluminación y enfriamiento. Igualmente, se dejarían de emitir 14,1 tCO₂ al año.

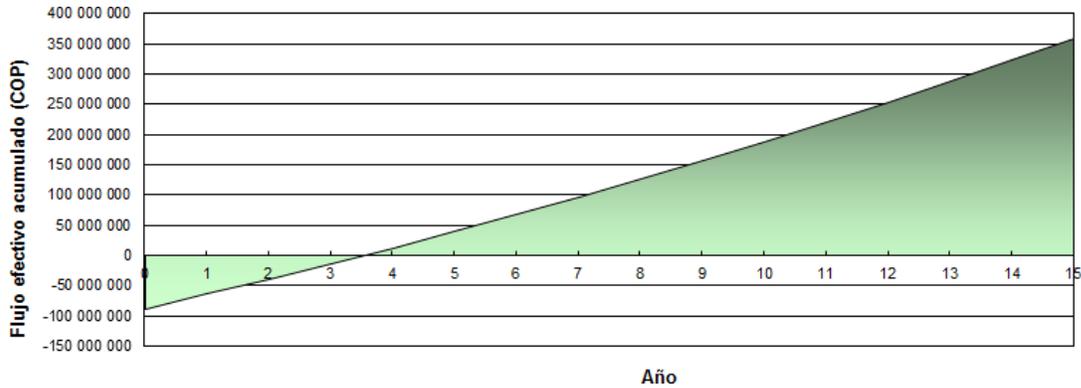


Figura 4.15. Flujo de caja acumulado con todas las medidas excepto la inclusión de cortasol. Fuente: Autor

Por último, se decidió evaluar el ahorro que se podría obtener implementando las medidas de eficiencia energética que no tienen costo alguno. Estas son las relacionadas con los horarios de uso del sistema de iluminación y del sistema de enfriamiento. Esta medida generaría un ahorro anual de 42,15 MWh lo que corresponde al 19,55% de la energía consumida por los dos sistemas. Igualmente, se produciría un ahorro anual de \$9.828.713 y ya que no es necesaria ninguna inversión, el tiempo de retorno es inmediato (ver Figura 4.16). Por otro lado, con este ahorro energético se dejarían de emitir 5,9 tCO₂ al año. En la Tabla 4.1 se presenta un resumen de todos los ahorros potenciales para cada medida de eficiencia energética.

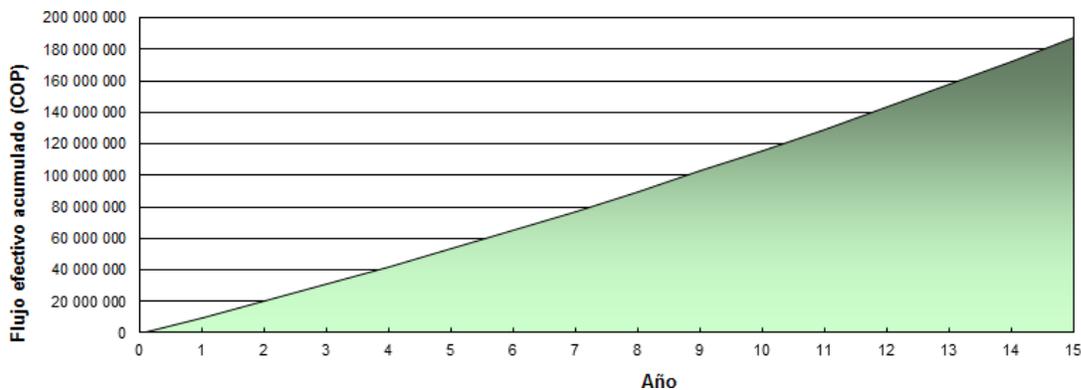


Figura 4.16. Flujo de caja acumulado con todas las medidas sin costo. Fuente: Autor

Tabla 4.1. Resumen de los ahorros para cada medida de eficiencia. Fuente: Autor

	Energía anual ahorrada		Costos (\$)	Ahorro anual (\$)	Reducción (tCO ₂)	Tiempo retorno (años)
	(MWh)	(%)				
Iluminación						
Horario	32,26	14,96	0	8.230.084	4,9	Inmediato
Lámparas	36,66	17,01	59.380.731	9.352.890	5,6	5,7
Horario y lámparas	54,26	25,17	59.380.731	13.841.818	8,3	4,0
Envolvente						
Vidrios	25,63	14,33	11.888.846	4.143.545	2,5	2,7
Cortasol	27,13	15,16	94.648.500	4.385.952	2,6	16,5
Infiltración	6,06	3,39	6.392.000	979.513	0,6	5,9
Vidrios e infiltración	31,69	17,71	18.280.846	5.123.058	3,1	3,3
HVAC						
Horario	9,89	5,53	0	1.598.629	1,0	Inmediato
Temperatura	18,16	9,22	10.500.000	2.936.213	1,8	3,3
Horario y temperatura	28,05	14,23	10.500.000	4.534.842	2,7	2,2
Conjunto						
Todas las medidas	113,36	48,50	88.161.577	23.395.566	14,1	3,5
Medidas sin costo	42,15	19,55	0	9.828.713	5,9	Inmediato

4.4 Energías renovables

El principal beneficio derivado de la utilización de la energía solar es la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente de CO₂, y además, puede ser utilizada en los entornos urbanos cerca de los puntos de consumo, lo que permite reducir los impactos negativos asociados a las infraestructuras de transporte y distribución de energía, principalmente eléctrica. El edificio de Parque i cuenta con dos techos en losa correspondiente a las cubiertas de los laboratorios de Energía Eléctrica y Potencia y de Máquinas Inteligentes, con una superficie de aproximadamente 170 m² como área disponible para la instalación de un sistema fotovoltaico conectado a la red. Para evaluar el potencial de este sistema se utilizó la herramienta Sketchup junto con el plugin de Skelion.

En primer lugar, se desarrolló el modelo en 3D del edificio a partir de los planos en AutoCAD de cada uno de los niveles del edificio (ver Figura 4.17). Posteriormente, se procedió a geolocalizar el modelo con la ayuda de Google Maps para realizar los cálculos de potencial solar en el sitio (ver Figura 4.18).

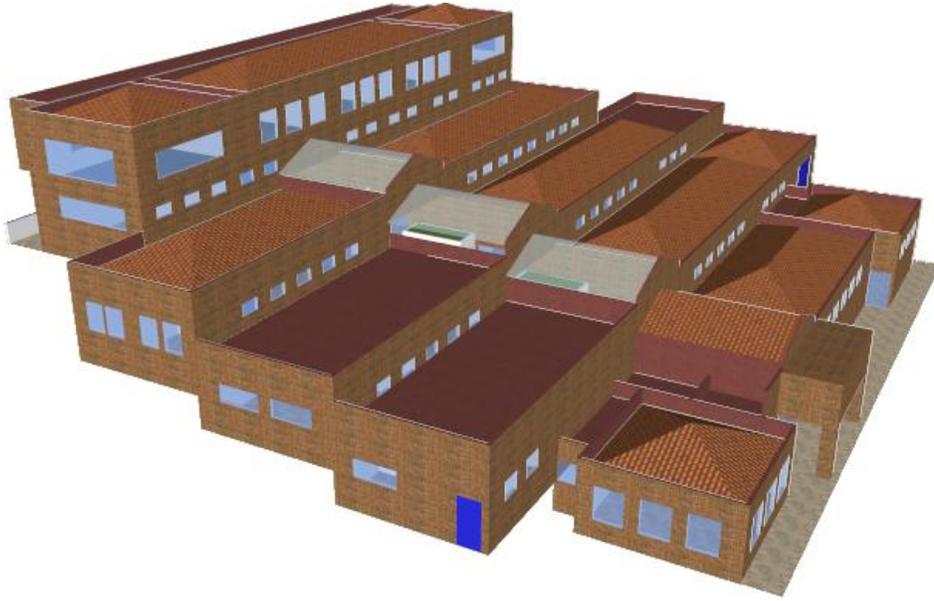


Figura 4.17. Modelo de Parque i creado en Sketchup. Fuente: Autor



Figura 4.18. Geolocalización del modelo con Google Maps. Fuente: Autor

Luego, se identificó el área disponible para la instalación de los paneles fotovoltaicos que no tuviera algún tipo de sombreado debido a las paredes y estructuras del mismo edificio (ver Figura 4.19). Por último, se procedió a ubicar paneles Yingli Solar YL245P-32b en las áreas previamente identificadas. Estos paneles multicristalinos tienen una potencia de 245 W, una eficiencia de hasta 15,6% y un peso de 22,5 kg. La evaluación con el plugin Skelion arrojó que se podría instalar 54 paneles para una potencia total de 13,23 kWp y un peso combinado de 1.215 kg (ver Figura 4.20). En el mercado, el costo aproximado de 1 kWp es de \$7.000.000.

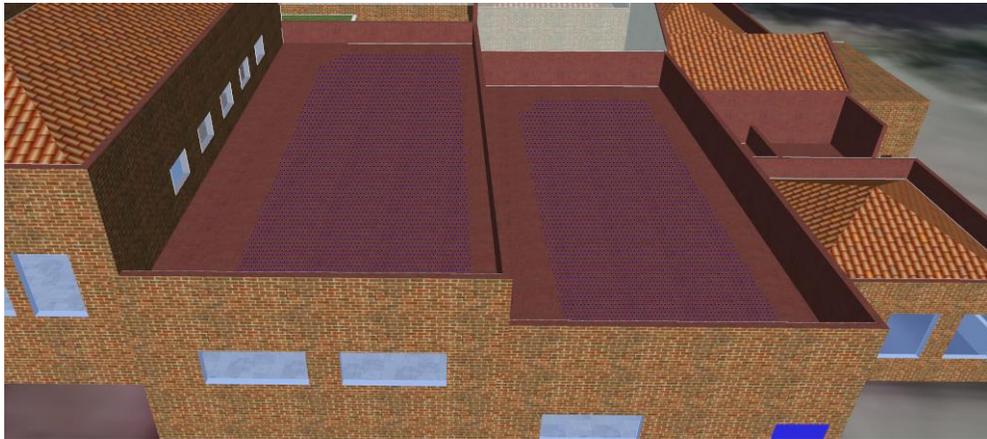


Figura 4.19. Identificación de áreas sin sombreado. Fuente: Autor



Figura 4.20. Ubicación de paneles en las áreas disponibles. Fuente: Autor

La instalación de este sistema fotovoltaico conectado a la red generaría un ahorro anual de 13,91 MWh lo que corresponde al 31,6% del consumo del sistema de iluminación. Igualmente, se produciría un ahorro anual de \$4.631.156 con una inversión inicial de \$92.610.000, dando un tiempo de retorno de 15,5 años (ver Figura 4.21). Por otro lado, con la implementación de este sistema se dejarían de emitir 2,8 tCO₂ al año.

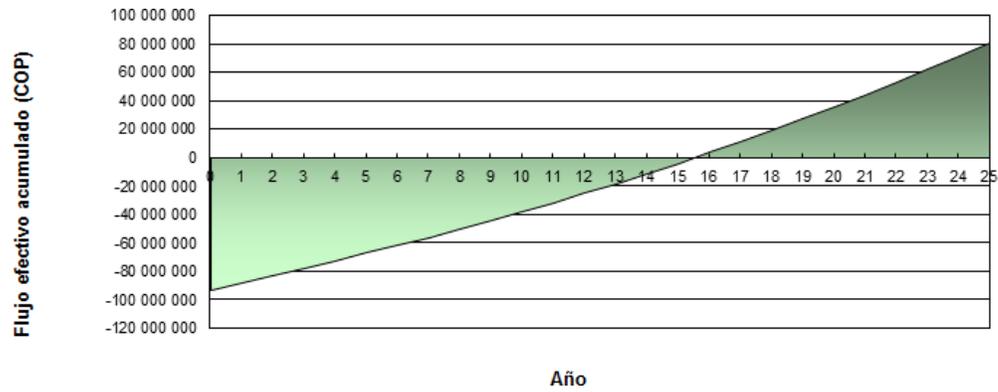


Figura 4.21. Flujo de caja acumulado del sistema fotovoltaico. Fuente: Autor

5. Conclusiones y trabajo futuro

5.1 Conclusiones

Se identificaron y evaluaron diferentes herramientas gratuitas para el cálculo de la eficiencia energética en edificios. Esta evaluación se hizo a partir de la clasificación presentada en la página web del Departamento de Energía (DOE) de Estados Unidos donde se catalogan las herramientas en cuatro grandes áreas: iluminación, envolvente, HVAC y otras que incluye renovables. De cada herramienta se revisaron sus principales características técnicas y una vez analizadas estas características y otras determinadas en los manuales de usuario de las diferentes herramientas, se seleccionó una (o dos) para cada grande sistema que conforma el edificio (iluminación, envolvente, HVAC y renovables).

Una vez seleccionadas las herramientas para cada sistema, se desarrolló una metodología integradora para evaluar el potencial de ahorro energético y hacer uso racional y eficiente del consumo de energía en edificios terciarios. La metodología desarrollada se apoya fundamentalmente en el uso de siete herramientas de simulación: herramientas para evaluar técnicamente las mejoras de cada gran sistema descrito anteriormente (DIALux para iluminación, WUFI y WINDOW para envolvente, RETScreen para HVAC y SketchUp + Skelion para renovables) y adicionalmente una herramienta para apoyarse en la obtención de costos (generador de precios) y una herramienta para evaluar la viabilidad económica de las medidas que se pudieran implementar (RETScreen).

Una vez desarrollada la metodología, se evaluaron diferentes medidas o técnicas para el uso racional y eficiente de la energía eléctrica y se realizó un análisis costo-efectivo de cada una de ellas. Las oportunidades para reducir al mínimo las necesidades de energía mediante la eficiencia energética y las energías renovables en los edificios comprendieron cambios en el sistema de iluminación, modificaciones en los materiales de la envolvente, adecuaciones en el uso del sistema de enfriamiento y la integración de un sistema fotovoltaico al edificio.

La evaluación de estas medidas y por lo tanto la validación de la metodología se realizó en el edificio Parque i del Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM) - sede Fraternidad, un edificio de tipo institucional que hace parte del sistema integrado de laboratorios científicos del ITM y cuenta con un área de aproximadamente 1.700 m² distribuidos en seis niveles. Debido a la complejidad en la división de las diferentes áreas, se tomaron dos espacios como elementos representativos y se evaluaron en ellos las medidas de eficiencia energética.

En cuanto al sistema de iluminación, se evaluaron las medidas de reducción del tiempo de uso de las lámparas (aprovechando la luz natural) y el reemplazo de las luminarias actuales por un sistema de alta eficiencia (LED). La primera medida, que no tiene costo alguno, generaría un ahorro anual de 32,26 MWh lo que corresponde al 14,96% de la energía consumida por el sistema de iluminación y produciría un ahorro anual de \$8.230.084. Se debe evitar, paralelamente, el uso innecesario y excesivo del alumbrado, y apagar las luces cuando no se estén utilizando, incluso durante periodos cortos. Es importante recordar a todas las personas que no se olviden de apagar las luces al salir del espacio en el que se encuentran. El potencial de ahorro se considera alto, aunque depende en gran medida del uso que ya se esté haciendo de la iluminación natural en cada espacio, así como de las características particulares de cada edificio (presencia de toldos u otros protectores solares, orientación del edificio, posibilidades y facilidad de introducir mejoras, etc.). Se pueden conseguir ahorros de hasta el 15% sobre el consumo eléctrico. La implementación de esta medida puede no llevar ningún costo asociado, aunque requiere de la participación e implicación de todo el personal afectado por la medida.

En cuanto al reemplazo de las luminarias por unas con mayor eficiencia, esta medida tendría un costo inicial de \$59.380.731 y produciría un ahorro anual de \$9.352.890 lo que daría un tiempo de retorno de 5,7 años. El ahorro anual de energía sería de 36,66 MWh lo que corresponde al 17,01% de la consumida por el sistema de iluminación. Cuando sea necesario recurrir a la iluminación artificial se deben utilizar los sistemas de iluminación más eficientes disponibles (con altos índices de eficiencia luminosa), en función de las necesidades de iluminación de cada zona del edificio. El potencial de ahorro se considera alto pero dependerá, en cada caso, de las características particulares de la instalación y del uso que se haga de la misma, según el número de horas de encendido y del tipo de lámpara sustituida. El costo de la implementación de esta medida puede ser alto y depende de la cantidad y del tipo de bombillas que se decida sustituir. Sin embargo, teniendo en cuenta el ahorro energético conseguido y la mayor vida útil de las lámparas de bajo consumo, la inversión se puede amortizar en pocos años.

En cuanto a la envolvente, se evaluaron tres medidas para reducir la energía requerida para enfriar el edificio: reemplazar las ventanas para reducir la ganancia solar, agregar un sombreado exterior (cortasol) y reducir las infiltraciones en ventanas y puertas. La implementación de vidrios con control solar generaría un ahorro anual de 25,63 MWh lo que corresponde al 14,33% de la energía consumida por el sistema de enfriamiento y produciría un ahorro anual de \$4.143.545 a partir de una inversión inicial de \$11.888.846, por lo que el tiempo de retorno sería de 2,7 años. El potencial de reducción se considera alto. Es variable, en función de muchos factores: número de ventanas, estado de las mismas, condiciones climáticas, etc. El costo de implementación puede ser alto, dependiendo de la solución a implantar, así como del número de ventanas/superficies acristaladas.

La inclusión de un cortasol en las áreas de las ventanas generaría un ahorro anual de 27,13 MWh lo que corresponde al 15,16% de la energía consumida por el sistema de enfriamiento. Sin embargo, se produciría un ahorro anual de \$4.385.952 con una inversión inicial de \$94.648.500 lo que daría un tiempo de retorno muy alto (16,5 años). Esto se debe a que el porcentaje de área de las paredes con acristalamiento es pequeña (10%) por lo que los ahorros obtenidos son pocos comparados con la inversión inicial. Esta medida sería más efectiva en fachadas totalmente acristaladas.

La reducción de las infiltraciones en puertas y ventanas generaría un ahorro anual de 6,06 MWh, lo que corresponde al 3,39% de la energía consumida por el sistema de enfriamiento, y produciría un ahorro anual de \$979.513 a partir de una inversión inicial de \$6.392.000, por lo que el tiempo de retorno sería de 5,9 años. El potencial de reducción del consumo se considera alto. Es variable, en función de muchos factores: número de ventanas y puertas, estado de las mismas, condiciones climáticas, etc. El costo de implementación es bajo y depende de las características particulares de cada espacio y del medio utilizado.

En cuanto al sistema HVAC, las medidas evaluadas fueron: ajustar el tiempo de funcionamiento del sistema al horario de ocupación del edificio y ajustar el control de temperatura de los espacios ya que se está enfriando de más el edificio. La primera medida no tiene costo alguno y produciría un ahorro anual de \$1.598.629 por lo que el tiempo de retorno es inmediato, además generaría un ahorro anual de 9,89 MWh lo que corresponde al 5,53% de la energía consumida por el sistema de enfriamiento. No hay que olvidar apagar los sistemas de aire acondicionado de las salas no ocupadas, tan sólo será necesario encenderlos unos minutos antes de que vayan a ser utilizadas. Esta medida tiene un costo de implementación bajo o

nulo aunque requiere de la participación e implicación de todo el personal afectado por la medida y el potencial de reducción es bajo.

La reubicación del termostato del sistema de enfriamiento y por lo tanto ajustar efectivamente la temperatura del espacio podría generar un ahorro anual de 18,16 MWh lo que corresponde al 9,22% de la energía consumida por el sistema de enfriamiento. Igualmente, se produciría un ahorro anual de \$2.936.213 con una inversión inicial de \$10.500.000 lo que daría un tiempo de retorno de 3,3 años. Mientras los equipos de climatización estén en funcionamiento, habrá que asegurarse que tanto las puertas como las ventanas están debidamente cerradas para impedir pérdidas de energía innecesarias. Es importante regular adecuadamente la temperatura del puesto de trabajo a unos niveles óptimos para mantener el confort de los empleados y evitar consumos de energía innecesarios. Ajustar el termostato un grado por encima o por debajo fuera del rango de temperaturas óptimo supone incrementar el consumo entre un 8-10%.

Hay cuatro factores que influyen en el consumo de energía en un edificio: Las personas y su comportamiento podrían hacer que se utilizará la energía de una forma más eficiente, igualmente el número de personas y de horas en que un edificio está ocupado es un factor determinante en la demanda de energía. El edificio mismo es un factor importante, el aprovechamiento máximo de la luz natural, el estado del edificio (grado de aislamiento térmico, estado de puertas, ventanas, persianas, etc.) la existencia de controles y regulación de las instalaciones energéticas del edificio y la distribución más eficiente del espacio de trabajo puede reducir notablemente el consumo de energía en climatización. El tipo de energía utilizada no solo afecta el consumo de energía sino también la cantidad de gases de efecto invernadero que se arrojan al ambiente, por lo tanto, la utilización de equipos de bajo consumo energético y el uso racional de los mismos son aspectos importantes a considerar. Por último, hay otros factores externos, como por ejemplo, las condiciones meteorológicas, que influyen en la demanda energética de las instalaciones energéticas del edificio.

Todas las medidas energéticas detalladas en este trabajo constituyen un primer paso para que una organización pueda alcanzar sus objetivos de ahorro y mejora de la eficiencia energética. Pero sin la concientización y la colaboración activa de todos los empleados será muy difícil alcanzar, en la práctica, los objetivos de reducción del consumo de energía y de emisiones de CO₂ fijados. La información, educación y sensibilización de las personas es una herramienta de vital importancia para garantizar la correcta operatividad del plan de mejora de la gestión energética de un edificio. Que el plan sea un éxito dependerá en gran medida del correcto uso

que se haga de los sistemas de iluminación, climatización y los equipos eléctricos del edificio y del cambio de los hábitos de consumo de los ocupantes.

5.2 Trabajo futuro

Como trabajo futuro se plantea:

- Generar un plan de mejora de eficiencia energética en el edificio con base en los resultados de este proyecto.
- Realizar una auditoría energética en el edificio para validar los valores base establecidos en este proyecto.
- Realizar un estudio detallado de centros de carga y costos considerando cada espacio de forma particular junto con sus consumos.
- Evaluar otras medidas de eficiencia energética para cada uno de los sistemas propuestos.

Bibliografía

- Abd Rashid, A. F., & Yusoff, S. (2015). A review of life cycle assessment method for building industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *45*, 244–248. doi:10.1016/j.rser.2015.01.043
- Abdellatif, M., & Al-Shamma'a, A. (2015). Review of sustainability in buildings. *Sustainable Cities and Society*, *14*, 171–177. doi:10.1016/j.scs.2014.09.002
- Acosta, I., Navarro, J., & Sendra, J. J. (2013). Daylighting design with lightscoop skylights: Towards an optimization of shape under overcast sky conditions. *Energy and Buildings*, *60*, 232–238. doi:10.1016/j.enbuild.2013.01.006
- Adamski, M. (2007). Optimization of the form of a building on an oval base. *Building and Environment*, *42*(4), 1632–1643. doi:10.1016/j.buildenv.2006.02.004
- Agha-Hosseini, M. M., El-Jouzi, S., Elmualim, A. A., Ellis, J., & Williams, M. (2013). Post-occupancy studies of an office environment: Energy performance and occupants' satisfaction. *Building and Environment*, *69*, 121–130. doi:10.1016/j.buildenv.2013.08.003
- Almeida, L., & Oliveira, A. C. (2008). Study of a hybrid PV-Thermal solar system to provide electricity and heat in Portugal. *International Journal of Ambient Energy*. doi:10.1080/01430750.2008.9675071
- Anderson, J. E., Wulfhorst, G., & Lang, W. (2015). Energy analysis of the built environment—A review and outlook. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. doi:10.1016/j.rser.2014.12.027
- Asdrubali, F., Baldinelli, G., Bianchi, F., & Sambuco, S. (2015). A comparison between environmental sustainability rating systems LEED and ITACA for residential buildings. *Building and Environment*. doi:10.1016/j.buildenv.2015.01.001
- ASHRAE. (1967). *ASHRAE Handbook of Fundamentals* (p. 544). American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Bellia, L., d'Ambrosio Alfano, F. R., Giordano, J., Ianniello, E., & Riccio, G. (2015). Energy requalification of a historical building: A case study. *Energy and Buildings*, *95*, 184–189. doi:10.1016/j.enbuild.2014.10.060
- Bhaskoro, P. T., Gilani, S. I. U. H., & Aris, M. S. (2013). Simulation of energy saving potential of a centralized HVAC system in an academic building using adaptive

- cooling technique. *Energy Conversion and Management*, 75, 617–628. doi:10.1016/j.enconman.2013.06.054
- Boait, P. J., Dixon, D., Fan, D., & Stafford, A. (2012). Production efficiency of hot water for domestic use. *Energy and Buildings*, 54, 160–168. doi:10.1016/j.enbuild.2012.07.011
- Bornatico, R., Pfeiffer, M., Witzig, A., & Guzzella, L. (2012). Optimal sizing of a solar thermal building installation using particle swarm optimization. *Energy*, 41(1), 31–37. doi:10.1016/j.energy.2011.05.026
- Bourdeau, L. (1996). *Environment and Buildings in France*.
- Brinks, P., Kornadt, O., & Oly, R. (2015). Air infiltration assessment for industrial buildings. *Energy and Buildings*, 86, 663–676. doi:10.1016/j.enbuild.2014.10.040
- Cáceres, J. (1996). Desenvolupament Sostenible. *Revista Tracte*, 66.
- Caldas, L. (2008). Generation of energy-efficient architecture solutions applying GENE_ARCH: An evolution-based generative design system. *Advanced Engineering Informatics*, 22(1), 59–70. doi:10.1016/j.aei.2007.08.012
- Casado, N. (1996). Edificios de alta calidad ambiental. *Alta Tecnología*.
- Chandel, S. S., & Sarkar, A. (2015). Performance assessment of a passive solar building for thermal comfort and energy saving in a hilly terrain of India. *Energy and Buildings*, 86, 873–885. doi:10.1016/j.enbuild.2014.10.035
- Chedwal, R., Mathur, J., Agarwal, G. Das, & Dhaka, S. (2015). Energy saving potential through Energy Conservation Building Code and advance energy efficiency measures in hotel buildings of Jaipur City, India. *Energy and Buildings*, 92, 282–295. doi:10.1016/j.enbuild.2015.01.066
- Chow, T. T., Zhang, G. Q., Lin, Z., & Song, C. L. (2002). Global optimization of absorption chiller system by genetic algorithm and neural network. *Energy and Buildings*, 34(1), 103–109. doi:10.1016/S0378-7788(01)00085-8
- Clarke, J. A., & McLean, D. (1986). *ESP: A building and plant energy simulation system*. Strathclyde.
- Cuadros, F., López-Rodríguez, F., Segador, C., & Marcos, A. (2007). A simple procedure to size active solar heating schemes for low-energy building design. *Energy and Buildings*, 39(1), 96–104. doi:10.1016/j.enbuild.2006.05.006
- Cucchiella, F., D'Adamo, I., Gastaldi, M., & Koh, S. C. L. (2012). Renewable energy options for buildings: Performance evaluations of integrated photovoltaic systems. *Energy and Buildings*, 55, 208–217. doi:10.1016/j.enbuild.2012.08.029

- Cui, P., Yang, H., Spitler, J. D., & Fang, Z. (2008). Simulation of hybrid ground-coupled heat pump with domestic hot water heating systems using HVACSIM+. *Energy and Buildings*, 40(9), 1731–1736. doi:10.1016/j.enbuild.2008.03.001
- Da Silva, P. C., Leal, V., & Andersen, M. (2012, July). Influence of shading control patterns on the energy assessment of office spaces. *Energy and Buildings*. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.enbuild.2012.03.019
- Das, N., Pal, N., & Pradip, S. K. (2015). Economic cost analysis of LED over HPS flood lights for an efficient exterior lighting design using solar PV. *Building and Environment*, 89, 380–392. doi:10.1016/j.buildenv.2015.03.005
- De Lieto Vollaro, R., Guattari, C., Evangelisti, L., Battista, G., Carnielo, E., & Gori, P. (2015). Building energy performance analysis: A case study. *Energy and Buildings*, 87, 87–94. doi:10.1016/j.enbuild.2014.10.080
- Domínguez-Muñoz, F., Cejudo-López, J. M., Carrillo-Andrés, A., & Ruivo, C. R. (2012). Design of solar thermal systems under uncertainty. *Energy and Buildings*, 47, 474–484. doi:10.1016/j.enbuild.2011.12.031
- Erdinc, O., & Uzunoglu, M. (2012, April). Optimum design of hybrid renewable energy systems: Overview of different approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.rser.2011.11.011
- Evarts, J. C., & Swan, L. G. (2013). Domestic hot water consumption estimates for solar thermal system sizing. *Energy and Buildings*, 58, 58–65. doi:10.1016/j.enbuild.2012.11.020
- Friess, W. A., Rakhshan, K., Hendawi, T. A., & Tajerzadeh, S. (2012). Wall insulation measures for residential villas in Dubai: A case study in energy efficiency. *Energy and Buildings*, 44(1), 26–32. doi:10.1016/j.enbuild.2011.10.005
- Fumo, N., Mago, P., & Luck, R. (2010). Methodology to estimate building energy consumption using EnergyPlus Benchmark Models. *Energy and Buildings*, 42(12), 2331–2337. doi:10.1016/j.enbuild.2010.07.027
- Gago, E. J., Muneer, T., Knez, M., & Köster, H. (2015). Natural light controls and guides in buildings. Energy saving for electrical lighting, reduction of cooling load. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. doi:10.1016/j.rser.2014.08.002
- González Couret, D., Rodríguez Díaz, P. D., & Abreu de la Rosa, D. F. (2013). Influence of architectural design on indoor environment in apartment buildings in Havana. *Renewable Energy*, 50, 800–811. doi:10.1016/j.renene.2012.07.043
- Güçyeter, B., & Günaydin, H. M. (2012). Optimization of an envelope retrofit strategy for an existing office building. *Energy and Buildings*, 55(2012), 647–659. doi:10.1016/j.enbuild.2012.09.031

- Gugliermetti, F., Passerini, G., & Bisegna, F. (2004). Climate models for the assessment of office buildings energy performance. *Building and Environment*, 39(1), 39–50. doi:10.1016/S0360-1323(03)00138-0
- Hee, W. J., Alghoul, M. A., Bakhtyar, B., Elayeb, O., Shameri, M. A., Alrubaih, M. S., & Sopian, K. (2015). The role of window glazing on daylighting and energy saving in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 323–343. doi:10.1016/j.rser.2014.09.020
- Heier, J., Bales, C., & Martin, V. (2015). Combining thermal energy storage with buildings – a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. doi:10.1016/j.rser.2014.11.031
- Hernandez, P., & Kenny, P. (2010). From net energy to zero energy buildings: Defining life cycle zero energy buildings (LC-ZEB). *Energy and Buildings*, 42(6), 815–821. doi:10.1016/j.enbuild.2009.12.001
- Hernandez, P., & Kenny, P. (2012). Net energy analysis of domestic solar water heating installations in operation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 170–177. doi:10.1016/j.rser.2011.07.144
- Hiller, M. D. E., Beckman, W. A., & Mitchell, J. W. (2000). TRNSHD — a program for shading and insolation calculations. *Building and Environment*. doi:10.1016/S0360-1323(99)00051-7
- Horvat, M., & Wall, M. (2012). *Solar design of buildings for architects: Review of solar design tools* (p. 117).
- Ihara, T., Gao, T., Grynning, S., Jelle, B. P., & Gustavsen, A. (2015). Aerogel granulate glazing facades and their application potential from an energy saving perspective. *Applied Energy*, 142, 179–191. doi:10.1016/j.apenergy.2014.12.053
- Jim, C. Y. (2014). Air-conditioning energy consumption due to green roofs with different building thermal insulation. *Applied Energy*, 128, 49–59. doi:10.1016/j.apenergy.2014.04.055
- Kamaruzzaman, S. N., Edwards, R., Zawawi, E. M. A., & Che-Ani, A. I. (2015). Achieving energy and cost savings through simple daylighting control in tropical historic buildings. *Energy and Buildings*, 90, 85–93. doi:10.1016/j.enbuild.2014.12.045
- Kanters, J., Horvat, M., & Dubois, M. C. (2014). Tools and methods used by architects for solar design. *Energy and Buildings*, 68(PART C), 721–731. doi:10.1016/j.enbuild.2012.05.031
- Karoglou, M., Moropoulou, A., Krokida, M. K., & Maroulis, Z. B. (2007). A powerful simulator for moisture transfer in buildings. *Building and Environment*, 42(2), 902–912. doi:10.1016/j.buildenv.2005.10.008

- Kim, K. H. (2011). A comparative life cycle assessment of a transparent composite façade system and a glass curtain wall system. *Energy and Buildings*, 43(12), 3436–3445. doi:10.1016/j.enbuild.2011.09.006
- Klein, S. A. (1983). *TRNSYS: A Transient System Simulation Program*.
- Kolokotsa, D., Rovas, D., Kosmatopoulos, E., & Kalaitzakis, K. (2011, December). A roadmap towards intelligent net zero- and positive-energy buildings. *Solar Energy*. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.solener.2010.09.001
- Laouadi, a, Atif, M. R., & Galasiu, A. (2003). Methodology towards developing skylight design tools for thermal and energy performance of atriums in cold climates. *Building and Environment*, 38(1), 117–127. doi:10.1016/S0360-1323(02)00009-4
- Lim, Y. W., Kandar, M. Z., Ahmad, M. H., Ossen, D. R., & Abdullah, A. M. (2012). Building facade design for daylighting quality in typical government office building. *Building and Environment*, 57, 194–204. doi:10.1016/j.buildenv.2012.04.015
- Liu, Y., & Harris, D. J. (2008). Effects of shelterbelt trees on reducing heating-energy consumption of office buildings in Scotland. *Applied Energy*, 85(2-3), 115–127. doi:10.1016/j.apenergy.2007.06.008
- Lotfabadi, P. (2014). High-rise buildings and environmental factors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 285–295. doi:10.1016/j.rser.2014.05.024
- Lu, Y., Wang, S., Zhao, Y., & Yan, C. (2015). Renewable energy system optimization of low/zero energy buildings using single-objective and multi-objective optimization methods. *Energy and Buildings*, 89, 61–75. doi:10.1016/j.enbuild.2014.12.032
- Marszal, A. J., Heiselberg, P., Bourrelle, J. S., Musall, E., Voss, K., Sartori, I., & Napolitano, A. (2011). Zero Energy Building - A review of definitions and calculation methodologies. *Energy and Buildings*, 43(4), 971–979. doi:10.1016/j.enbuild.2010.12.022
- Mikučionienė, R., Martinaitis, V., & Keras, E. (2014). Evaluation of energy efficiency measures sustainability by decision tree method. *Energy and Buildings*, 76, 64–71. doi:10.1016/j.enbuild.2014.02.048
- Mitalas, G. P., & Stephenson, D. G. (1967). Room thermal response factors. *ASHRAE Transactions*, 73(1), 1–10.
- Moschetti, R., Mazzarella, L., & Nord, N. (2015). An overall methodology to define reference values for building sustainability parameters. *Energy and Buildings*. doi:10.1016/j.enbuild.2014.11.071
- Ndoye, B., & Sarr, M. (2008). Analysis of domestic hot water energy consumption in large buildings under standard conditions in Senegal. *Building and Environment*, 43(7), 1216–1224. doi:10.1016/j.buildenv.2007.02.012

- Ochoa, C. E., & Capeluto, I. G. (2009). Advice tool for early design stages of intelligent facades based on energy and visual comfort approach. *Energy and Buildings*, 41(5), 480–488. doi:10.1016/j.enbuild.2008.11.015
- Olivia, G., & Aidan, T. (2015). In-use monitoring of buildings: An overview and classification of evaluation methods. *Energy & Buildings*. doi:10.1016/j.enbuild.2014.10.005
- Pedrini, A., Westphal, F. S., & Lamberts, R. (2002). A methodology for building energy modelling and calibration in warm climates. *Building and Environment*, 37(8-9), 903–912. doi:10.1016/S0360-1323(02)00051-3
- Peng, C., & Wu, Z. (2008). Thermoelectricity analogy method for computing the periodic heat transfer in external building envelopes. *Applied Energy*, 85(8), 735–754. doi:10.1016/j.apenergy.2008.02.003
- Perlova, E., Platonova, M., Gorshkov, A., & Rakova, X. (2015). Concept Project of Zero Energy Building. *Procedia Engineering*, 100, 1505–1514. doi:10.1016/j.proeng.2015.01.522
- Ralegaonkar, R. V., & Gupta, R. (2010). Review of intelligent building construction: A passive solar architecture approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. doi:10.1016/j.rser.2010.04.016
- Rankin, R., & Rousseau, P. G. (2006). Sanitary hot water consumption patterns in commercial and industrial sectors in South Africa: Impact on heating system design. *Energy Conversion and Management*, 47(6), 687–701. doi:10.1016/j.enconman.2005.06.002
- Sadineni, S. B., Madala, S., & Boehm, R. F. (2011). Passive building energy savings: A review of building envelope components. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 3617–3631. doi:10.1016/j.rser.2011.07.014
- Sharma, N., Varun, & Siddhartha. (2012, April). Stochastic techniques used for optimization in solar systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. doi:10.1016/j.rser.2011.11.019
- Shaw, M. (1996). Computer Modelling as a Design Tool for Predicting Building Performance. *Proc. CIBSE A: Build. Serv. Eng. Res. Technol.*, 17(2), B1–B11.
- Shi, L., & Chew, M. Y. L. (2012, January). A review on sustainable design of renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. doi:10.1016/j.rser.2011.07.147
- Stazi, F., Bonfigli, C., Tomassoni, E., Di Perna, C., & Munafò, P. (2015). The effect of high thermal insulation on high thermal mass: Is the dynamic behaviour of traditional envelopes in Mediterranean climates still possible? *Energy and Buildings*, 88, 367–383. doi:10.1016/j.enbuild.2014.11.056

- Stroupe, R. (2010). *Energy Auditing Techniques for Small and Medium Commercial Facilities*.
- Syrrakou, E., Papaefthimiou, S., & Yianoulis, P. (2006). Eco-efficiency evaluation of a smart window prototype. *Science of the Total Environment*, 359(1-3), 267–282. doi:10.1016/j.scitotenv.2005.10.023
- Tabares-Velasco, P. C., Christensen, C., & Bianchi, M. (2012). Verification and validation of EnergyPlus phase change material model for opaque wall assemblies. *Building and Environment*, 54, 186–196. doi:10.1016/j.buildenv.2012.02.019
- Todorovic, M. S., & Kim, J. T. (2014). In search for sustainable globally cost-effective energy efficient building solar system – Heat recovery assisted building integrated PV powered heat pump for air-conditioning, water heating and water saving. *Energy and Buildings*, 85, 346–355. doi:10.1016/j.enbuild.2014.08.046
- Tsangrassoulis, a, & Santamouris, M. (2000). Method to estimate the daylight efficiency of round skylights. *Energy and Buildings*, 32(1), 41–45. doi:10.1016/S0378-7788(99)00039-0
- U.S. Department of Commerce. (1980). *DOE-2 manuals (Version 2.1)*. Springfield.
- Wang, Y., Kuckelkorn, J., Zhao, F.-Y., Liu, D., Kirschbaum, A., & Zhang, J.-L. (2015). Evaluation on classroom thermal comfort and energy performance of passive school building by optimizing HVAC control systems. *Building and Environment*, 89, 86–106. doi:10.1016/j.buildenv.2015.02.023
- Wei, W., Ramalho, O., & Mandin, C. (2015). Indoor Air Quality Requirements in Green Building Certifications. *Building and Environment*. doi:10.1016/j.buildenv.2015.03.035
- Xercavins, J. (1996). ¿Qué es el desarrollo sostenible? In *I Jornadas: Construcción y Desarrollo Sostenible* (pp. 172–174). Barcelona: Col.Apar. y Arq. Téc. de Barcelona.
- Xiao, F., & Wang, S. (2009, June). Progress and methodologies of lifecycle commissioning of HVAC systems to enhance building sustainability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. doi:10.1016/j.rser.2008.03.006
- Ye, H., Long, L., Zhang, H., & Zou, R. (2014). The performance evaluation of shape-stabilized phase change materials in building applications using energy saving index. *Applied Energy*, 113, 1118–1126. doi:10.1016/j.apenergy.2013.08.067
- Yu, J., Tian, L., Xu, X., & Wang, J. (2015). Evaluation on energy and thermal performance for office building envelope in different climate zones of China. *Energy and Buildings*, 86, 626–639. doi:10.1016/j.enbuild.2014.10.057

Zhang, X. (2015). Green real estate development in China: State of art and prospect agenda—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 1–13. doi:10.1016/j.rser.2015.03.012