



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Sistema de soporte al diseño activo y pasivo de construcciones sostenibles

Esteban Camilo Lage Cano

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Energía Eléctrica y Automática
Medellín, Colombia
2022

Sistema de soporte al diseño activo y pasivo de construcciones sostenibles

Esteban Camilo Lage Cano

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Automatización Industrial

Director:

Ing. Jairo Espinosa Oviedo Ph.D.

Codirector:

Ing. Christian Roviro Portilla Caicedo Ph.D

Línea de Investigación:

Construcciones Sostenibles

Grupo de Investigación:

Grupo de Automática de la Universidad Nacional (GAUNAL)

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Energía Eléctrica y Automática

Medellín, Colombia

2022

A mi familia.

Agradecimientos

Agradezco a mis padres Maria Eugenia y Elias Camilo y a mi hermano Camilo por acompañarme, apoyarme, amarme y ser el soporte que me mantuvo de pie ante los escabrosos caminos que he recorrido en mi vida y en especial esta tesis.

Agradezco a Viviana por tolerarme, animarme y amarme sin importar lo difícil que fui durante mi desarrollo profesional.

Agradezco a mi amigo y codirector Christian Portilla por guiarme, apoyarme, inspirarme y salvarme de la frustración que enfrenté en el desarrollo de esta tesis.

Agradezco a mi profesor, tutor y director de tesis Jairo Espinosa por la acertada orientación, el apoyo y por dotarme de herramientas que me hacen ser el ingeniero que soy.

Agradezco a mis amigos y a todas las personas que me acompañaron en este proyecto, en especial a Edward, Oscar y a Juan David. Quienes me llenaron de fuerzas y buenos momentos que fueron indispensables para concluir esta etapa.

Esta tesis se enmarca en la alianza interinstitucional Energética 2030 en el P2: Construcción Sostenible. El proyecto “Estrategia de transformación del sector energético Colombiano en el horizonte de 2030” ha recibido financiación de la convocatoria 778 del programa “Ecosistema Científico” de Minciencias bajo el acuerdo de subvención FP44842-210-2018.

Resumen

En este trabajo se presenta una herramienta desarrollada con el objetivo de brindar soporte al diseño activo y pasivo de una construcción. Esta herramienta utiliza la metodología de modelado de resistencia y capacitancia térmica para estimar las dinámicas térmicas y energéticas de una construcción. El soporte consiste en proporcionar sugerencias al profesional diseñador principalmente sobre el diseño pasivo de la construcción. Estas sugerencias se producen mediante la solución de un problema de optimización multiobjetivo basado en simulación en el que se optimiza el costo de inversión inicial de los materiales de construcción, el confort y el consumo energético. El método de optimización es desarrollado mediante la integración del algoritmo de evolución diferencial programado en Python con OpenModelica como el software de simulación de la construcción. Esta herramienta utiliza las librerías Aixlib y Buildings desarrolladas en el marco del proyecto IEA EBC Annex 60 en el lenguaje Modelica. Esta herramienta metodológica es aplicada al caso de estudio establecido en la Sección 5.2.1 de la norma ANSI/ASHRAE 140-2001, el Caso de Prueba 600. En el método de optimización, se toman como variables de decisión la orientación, la inclusión o exclusión de toldos, las propiedades térmicas de la envolvente térmica y el tamaño y propiedades térmicas de las ventanas. Como función objetivo para optimizar el confort, se cuenta con el índice PPD desarrollado por Fanger [19], para cuantificar el consumo energético se cuenta con las cargas anuales de refrigeración y calentamiento, y para optimizar la inversión inicial en el costo de los materiales, se presentan tablas con los valores estimados de los mismos. Tras utilizar la herramienta en el caso de estudio, se obtuvo un ahorro en la carga de refrigeración del 72% y del 83% en la carga de calentamiento, con respecto a la configuración inicial, interviniendo únicamente en el diseño pasivo de la construcción.

Palabras clave: Optimización, construcción sostenible, resistencia y capacitancia térmica

Support system for active and passive design of sustainable constructions

Abstract

In this work, a tool developed with the objective of providing support to the active and passive design of a construction is presented. This tool uses the thermal resistance and capacitance modeling methodology to estimate the thermal and energetic dynamics of a building. The support consists of providing suggestions to the professional designer mainly on the passive design of the construction. These suggestions are produced by solving a simulation-based multi-objective optimization problem, in which the initial investment cost of building materials, comfort, and energy consumption are optimized. The optimization method is developed by integrating the differential evolution algorithm programmed in Python with OpenModelica as the construction simulation software. This tool uses the Aixlib and Buildings libraries developed within the framework of the IEA EBC Annex 60 project in the Modelica language. This methodological tool is applied to the case study established in Section 5.2.1 of the ANSI/ASHRAE 140-2001 standard, Test Case 600. In the optimization method, orientation, inclusion or exclusion of sunblinds, the thermal properties of the building envelope and the size and thermal properties of the windows are taken as decision variables. As an objective function to optimize comfort, the PPD index developed by Fanger is used [19], to quantify energy consumption, annual cooling and heating loads are used, and to optimize the initial investment in the cost of materials, tables are presented with their estimated values. After using the tool in the case study, a saving of 72 % in the cooling load and 83 % in the heating load were obtained, with respect to the initial configuration, intervening only in the passive design of the construction.

Keywords: Optimization, sustainable construction, thermal resistance and capacitance

Contenido

Agradecimientos	VII
Resumen	IX
1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo General	3
1.2.2. Objetivos Específicos	3
1.3. Esquema de la tesis	3
2. Estado del arte	6
2.1. Aspectos generales del modelado energético en construcciones sostenibles . .	7
2.2. Confort y sostenibilidad	8
2.3. Calentamiento y refrigeración	11
2.3.1. Sistemas de climatización HVAC	11
2.4. Modelado de elementos de generación, almacenamiento y consumo de energía eléctrica	12
2.4.1. Sistemas fotovoltaicos	12
2.4.2. Sistemas solares térmicos	14
2.5. Esquemas de optimización en el contexto de construcciones sostenibles . . .	20
2.6. Modelado matemático para la predicción del consumo de energía	22
2.7. Evaluación de costos y cuantificación económica de los elementos de la construcción sostenible	23
3. Metodología para el modelado matemático de zonas térmicas	26
3.1. Conceptos importantes para el modelado matemático de zonas térmicas . . .	26
3.1.1. Diseño pasivo en una construcción	27
3.1.2. Diseño activo en una construcción	29
3.2. Caracterización de variables ambientales	30
3.2.1. Radiación solar	30
3.2.2. Geometría solar	31
3.2.3. Procesamiento de variables de entrada del modelo	34

3.3. Modelo matemático de la construcción	37
3.3.1. Conceptos importantes	37
3.3.2. Metodología de modelado	40
3.3.3. Librerías Aixlib y Buildings	43
3.3.4. Validación de la metodología	45
3.4. Software de simulación para modelos térmicos de construcciones	47
3.4.1. Archivos gbXML	47
3.4.2. Fachadas	49
4. Esquemas de optimización	52
4.1. Optimización del confort de la construcción	52
4.2. Optimización para la selección de los materiales constructivos	56
5. Resultados y análisis	59
5.1. Primer paso de la metodología de optimización	59
5.2. Segundo paso de la metodología de optimización	60
6. Conclusiones y recomendaciones	68
6.1. Conclusiones	68
6.2. Recomendaciones	69
A. Anexo: Tabla de materiales disponibles	70
Bibliografía	72

1. Introducción

En este capítulo se introduce el contenido de esta tesis a partir de la motivación y justificación del problema, en donde se exponen las ideas por las cuales esta tesis es oportuna en el contexto mundial y nacional. Luego, se presenta el planteamiento del problema de investigación que tiene como objetivo solucionar esta tesis. Posteriormente se presenta el objetivo principal y los objetivos específicos de la tesis. Después se presenta la metodología en la que se realiza una descripción general de los métodos desarrollados para lograr los resultados finales de la tesis y finalmente se presenta un resumen general del contenido de la tesis.

1.1. Motivación

El número de construcciones residenciales, comerciales e industriales aumentan exponencialmente en el mundo [42], así mismo, aumentan en la misma proporción la demanda energética y la generación de dióxido de carbono. El panorama global de consumo y generación de energía eléctrica avanza de manera positiva, en tanto los estudios revelan que la reacción del planeta ante la crisis de contaminación ha sido acertada. Al respecto, Romero et al. [42] realizaron un estudio hacia el año 2013 el cual expone que el sector residencial representa el 25 % de la energía consumida en el mundo, y cerca del 50 % de esta energía proviene de fuentes de energía renovables. También mencionan que el 23 % de toda la energía consumida proviene directa e indirectamente de recursos renovables. Además, se hace una revisión sobre la evaluación del consumo y generación de energía en el periodo que contempla los inicios del año 1993 hasta el año 2013, estos revelan que globalmente se aumentó el consumo energético en un 46 %, el consumo en el sector residencial se mantuvo en un 25 %, y el consumo de energía renovable en el sector residencial aumentó en un 33 %. Estos crecimientos son prometedores para las expectativas que tiene el mundo ante las metas propuestas para los años 2030 y 2050. Lastimosamente este panorama no se mantiene en todas las regiones del mundo, en Latinoamérica, por ejemplo, hacia el 2013 la energía total consumida representaba el 7 % de la energía consumida en el mundo, su consumo en el sector residencial era del 4 %; de la cual solo el 14 % de la energía proviene de recursos renovables. La tasa de crecimiento de toda la energía consumida es del 68 % y 32 % en el sector residencial para el mismo periodo y 17 % para el consumo de energías renovables. Por otra parte, Europa tuvo crecimiento de hasta el 95 % de uso de energías renovables en el sector residencial. En el caso específico de Colombia el panorama es aún más desalentador, pues para el año 2015 la Unidad de Planeación Minero Energética de Colombia (UPME) reportó que la energía proveniente de fuentes renovables

representaba sólo el 22 % del total de la energía consumida. Aunque estas cifras sean inferiores a los resultados mencionados en el periodo del 2013, hay estudios que revelan cifras aún más alarmantes; en [46] se expone que Colombia para el año 2029 aspira satisfacer tan solo el 15 % de la demanda energética con la capacidad instalada en energías renovables. En vista de esto el país ha generado iniciativas para mejorar los indicadores antes mencionados, entre ellas se encuentra el proyecto Energética 2030. Se trata de una alianza interinstitucional liderada por la Universidad Nacional, conformada por 11 organizaciones: 8 Universidades y 3 empresas, para ejecutar un programa de I+D+i, financiado por el Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación (Minciencias) en el marco de Colombia Científica. El proyecto presentado en este documento se encuentra dentro del marco del proyecto Energética 2030 y tiene como objetivo aportar desde el marco de la construcción sostenible, una metodología para promover el uso de energías renovables y disminuir el consumo de energía en el sector residencial, proporcionando una solución asequible ante el problema energético que vive el país.

Se han realizado diferentes estudios para determinar cuáles son los componentes principales de la demanda energética en una construcción. En [12] los autores afirman que entre el 40 – 60 % del consumo energético en una construcción se debe a el acondicionamiento térmico, y hacen hincapié en la dependencia de este valor con las particularidades de cada uno de los ocupantes. Para el caso colombiano, esta es una cifra que depende drásticamente del estrato de los usuarios. La UPME revela que el uso de energía eléctrica para el acondicionamiento térmico para construcciones residenciales de estratos mayores o iguales al 3 abarca desde el 20 – 65 %. El consumo en iluminarias es constante para todos los estratos y circunda alrededor del 10 %. Estos valores pueden disminuir de manera significativa implementando estrategias óptimas de operación y elaboración de la construcción, por ejemplo, en zonas cálidas como San Andrés, Providencia y Santa Catalina. De igual manera, para las zonas climáticas más frías del país, existen estrategias que permiten almacenar el calor proveniente del sol y evitar el consumo eléctrico por calentadores.

Se identifica entonces una clara problemática en el sector residencial; la tasa de crecimiento del consumo energético crece significativamente, mientras que la generación de estrategias para disminuir el consumo energético en el sector residencial no crece.

En la última década, las soluciones relacionadas con la disminución de consumo de energía eléctrica o el aprovechamiento de recursos renovables en el sector residencial, se han encaminado en el uso de una herramienta llamada BIM [1] (Building Information Modelling). BIM es una poderosa herramienta metodológica en la industria arquitectónica, ingenieril y de construcción que permite interoperabilidad entre todas las disciplinas que intervienen en la construcción de una edificación o una obra civil. Además, permite gestionar eficientemente toda la información relacionada con el proyecto. En general, dentro de las construcciones sostenibles se busca optimizar el confort del usuario, la energía consumida, el costo de ciclo de vida y el caso de esta tesis, la inversión inicial.

Sin embargo, para el caso colombiano, la inversión inicial es un factor determinante a la hora

de proponer una construcción sostenible, dado que, la capacidad adquisitiva de un ciudadano promedio es muy limitada y proponer soluciones sin esta consideración podría resultar en una inversión inicial inalcanzable debido al alto costo de los materiales de construcción. Entonces, se considera oportuno desarrollar una metodología de construcción sostenible que permita optimizar la inversión inicial, el costo de ciclo de vida y el porcentaje de inconformidad de los ocupantes.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Diseñar una metodología para el diseño pasivo y activo de una construcción de manera que balancee el confort, el consumo energético, el costo de ciclo de vida y la inversión económica inicial.

1.2.2. Objetivos Específicos

1. Construir bases de datos compuestas por información financiera, materiales de construcción y sus características térmicas.
2. Automatizar la generación del modelo térmico a partir del diseño arquitectónico.
3. Construir una herramienta que permita analizar el desempeño térmico de la construcción, los costos de construcción y operación e indicadores de confort.
4. Encontrar los materiales de construcción óptimos y la estrategia de operación óptima para cumplir con los objetivos establecidos con las restricciones establecidas.
5. Automatizar la generación de estrategias que mejoren el desempeño del diseño propuesto de acuerdo con los criterios planteados por el usuario.

1.3. Esquema de la tesis

Esta tesis está organizada de la siguiente manera; El Capítulo 2 se presenta una revisión del estado del arte los elementos que tienen impacto en el contexto de las construcciones sostenibles, entre ellos se encuentran: los aspectos generales del modelado energético en construcciones sostenibles, el confort, el calentamiento y la refrigeración, el modelado de elementos de generación, el almacenamiento y consumo de energía eléctrica, los esquemas de optimización en el contexto de construcciones sostenibles, el modelado matemático para la predicción del consumo de energía y finalmente la revisión sobre la evaluación de costos y cuantificación económica de los elementos de una construcción sostenible. En este capítulo

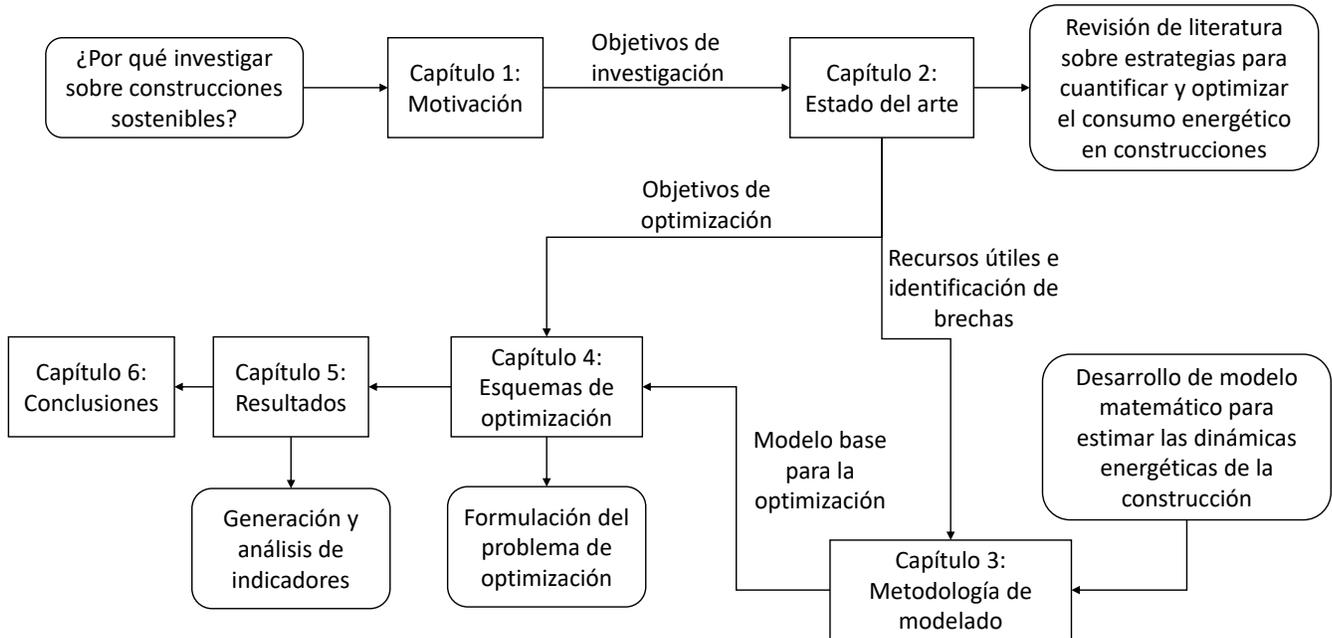


Figura 1-1.: Marco conceptual de la estructura de la tesis

se construye la base de datos sobre los materiales constructivos como lo especifica el objetivo específico 1. Esta base de datos se presenta en la tabla del Anexo A.

En el Capítulo 3 se realiza la descripción de la formulación de la metodología de modelado de zonas térmicas. Esta descripción cubre el proceso de modelado desde el procesamiento de las variables climatológicas, la metodología de modelamiento de resistencia y capacitancia térmica y las librerías que se utilizarán para la implementación del modelo en el software llamado Nest Designer desarrollado en el marco de esta tesis. Este modelo será la herramienta especificada en el objetivo específico 3. Mediante este modelo se podrá analizar el desempeño térmico de la construcción, los costos de construcción y operación y permitirá generar y evaluar indicadores de confort. El software Nest Designer se diseñó con el objetivo de automatizar la generación de modelos térmicos de construcciones y la generación de estrategias para mejorar el desempeño de la construcción, tal y como lo establecen los objetivos específicos 2 y 5.

En el Capítulo 4 se presenta el esquema de optimización multiobjetivo para minimizar el costo de inversión inicial, el consumo energético y optimizar el confort térmico dentro de la construcción. Esto mediante la búsqueda de los materiales óptimos, la configuración pasiva óptima de la construcción y la estrategia de operación óptima. De esta forma se le da cumplimiento al objetivo específico 4.

En el Capítulo 5 se presentan los resultados obtenidos tras aplicar la metodología en el caso de estudio establecido en la Sección 5.2.1 de la norma ANSI/ASHRAE 140-2001.

Finalmente, en el Capítulo 6 se presentan las conclusiones obtenidas en la tesis y se realizan recomendaciones sobre el uso de la metodología y el software.

De manera resumida se presenta el marco conceptual en la Figura **1-1**. En donde se evidencia la relación entre cada uno de los capítulos de la tesis y se destacan los aspectos mas importantes de cada uno.

2. Estado del arte

Debido a los acontecimientos globales como el cambio climático, la disminución de los recursos naturales hasta el punto de la escasez y las diversas crisis económicas a nivel mundial, el concepto de sostenibilidad ha venido tomando fuerza y cobrando gran interés. En [43] se define el concepto de sostenibilidad, como algo que perdura en el tiempo, y el de desarrollo, el cual solo es posible si el esfuerzo para lograrlo se sostiene.

Por otro lado, en [2] se detalla el concepto de sostenibilidad a partir de lo mencionado en la Comisión Mundial de Medioambiente y Desarrollo de 1987, donde definen la sostenibilidad como la utilización de recursos para satisfacer las necesidades presentes sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades (WCED, 1987). Además, aseguran que existe un creciente reconocimiento de que las organizaciones deben abordar el tema de la sostenibilidad en sus operaciones.

Independiente de lo que manifieste cada autor en la literatura en cuanto al concepto de sostenibilidad, parece haber un punto en el que todos convergen y es en el hecho de que, debido a las situaciones expresadas al inicio de esta sección, es necesario realizar actividades que apunten a ambientes y procesos sostenibles. Por lo tanto, surge la necesidad de identificar los sectores donde el consumo energético sea tan alto que atente contra su propia perdurabilidad y aplicar en ellos estrategias de sostenibilidad que garanticen su existencia a largo plazo. Este nivel de consumo significativo requiere una comprensión detallada de las características de consumo del sector residencial, ya que este es en gran parte un sumidero de energía indefinido.

En este punto, surge la necesidad de analizar en detalle los elementos que integran una residencia, es decir, la construcción en sí misma, los individuos que conviven en ella, los equipos usados para su confort y el medioambiente. Además, es necesario conocer cuáles son los procesos energéticos que se llevan a cabo en el hábitat, considerando los elementos mencionados de manera integrada. Para esto, se debe hacer uso de conceptos de termodinámica con el fin de estudiar las diferentes formas de energía de cada elemento de la construcción. En este orden de ideas, se debe realizar un análisis a los ambientes residenciales cuyos resultados permitan establecer sus dinámicas, interacciones y eficiencias, y que finalmente apunte al hallazgo de un índice de sostenibilidad.

Este capítulo tiene como propósito mostrar los avances realizados en la literatura sobre los elementos que influyen en el proceso de elaboración de una construcción sostenible. Primero en la Sección 2.1 se realiza una contextualización sobre el modelado energético en construcciones sostenibles y la forma en la que se abordará en la tesis. Posteriormente en la Sección

2.2 se presentará el índice de confort actualmente más utilizado para caracterizar la sensación térmica de los habitantes de una construcción. Luego en la Sección 2.3 se realizará una discusión sobre los dispositivos HVAC y su papel en las construcciones sostenibles. Posteriormente en la sección 2.4 se realiza una revisión sobre las metodologías de modelado de elementos de generación, almacenamiento y consumo de energía eléctrica. Luego en la Sección 2.6 se presentan las metodologías Top-down y Bottom-up para la predicción del consumo energético, por último en la Sección 2.7 se exponen las estrategias de evaluación de costos en proyectos de construcciones sostenibles presentes en la literatura y en el contexto nacional.

2.1. Aspectos generales del modelado energético en construcciones sostenibles

Para mantener la comodidad y funcionalidad de una construcción, esta necesita una cantidad definida de energía que debe ser suministrada. La cantidad de energía necesaria puede ser estimada a través de un balance de energía. La demanda se calcula acumulando tanto las pérdidas de energía como las pérdidas de calor de la transmisión y la ventilación de la envolvente del edificio. Estas pérdidas pueden ser compensadas total o parcialmente por las ganancias de energía (ganancias internas causadas por los aparatos y usuarios) o por las ganancias solares a través de las aberturas, disminuyendo con esto la cantidad de energía de calefacción que se debe suministrar. La deducción de las ganancias de las pérdidas globales da como resultado la demanda de energía global que debe ser entregada [49]. El análisis energético busca entonces cuantificar la energía necesaria para proveer confort a los usuarios residentes de la construcción, teniendo en cuenta variables climáticas, la envolvente térmica, ganancias de calor internas y los dispositivos de aclimatación térmica.

Con el ánimo de realizar un análisis energético en una construcción, es necesario contar con los modelos de los diferentes equipos involucrados en la conformación de un hábitat cómodo, o con modelos que integren todos los sistemas que conforman una construcción habitada, es por eso que muchos autores han realizado diferentes esfuerzos para encontrar modelos que representen fielmente la interacción de estos sistemas y que suministren información útil con el propósito de convertirla en herramientas de sostenibilidad.

Las herramientas para el análisis de las dinámicas térmicas se pueden dividir en tres grupos diferentes, ya sea en función de un modelo de cálculo estadístico, un modelo de cálculo físico o un modelo basado en métodos con inteligencia computacional. Los modelos de cálculo físico hacen posible el cálculo preciso de tareas detalladas, así como el consumo total de energía. Desde las zonas de carga, la luz del día y el flujo de aire solar, se encuentran disponibles cálculos altamente precisos para cada tarea de ingeniería posible. Los modelos de cálculo estadístico son modelos simplificados para la estimación de la demanda de energía total, la demanda de energía de calefacción o iluminación. Regulaciones de ahorro de energía, como la alemana, utilizan modelos de cálculo estadístico para su aplicación obligatoria en el proceso

de construcción [49]

Los modelos de energía residencial se basan en datos de entrada para calcular o simular el consumo de energía. El nivel de detalle de los datos de entrada disponibles puede variar dramáticamente, resultando en el uso de diferentes técnicas de modelado que buscan aprovechar la información disponible. Estas diferentes técnicas de modelado tienen diferentes fortalezas, debilidades, capacidades y aplicabilidad [53]. Para analizar los sistemas, es necesaria una visión integrada del edificio, la cual debe incluir la geometría del edificio, la construcción y los sistemas técnicos, por lo que la información multidisciplinaria del diseño del edificio es crucial. En general, el análisis energético de una construcción es realizado después de la etapa de diseño, lo que reduce las posibilidades en cuanto a la toma de decisiones, por lo tanto, se aconseja que dicho análisis debe ser integrado al momento de realizar el diseño de la construcción [49].

Dependiendo de la metodología de modelado que se utilizará, los datos de entrada necesarios para desarrollar modelos de energía residenciales incluyen información sobre las características físicas de las viviendas, los ocupantes y sus aparatos, el consumo histórico de energía, las condiciones climáticas y los indicadores macroeconómicos. La información se puede recopilar de forma independiente o simultánea, puede ser un conjunto nacional o un valor de vivienda individual, y puede variar mucho en el nivel de detalle. El método básico de recolección de información es por encuesta, cuyos resultados se publican en forma cruda o analizada [53]. La estimación del consumo energético y las dinámicas térmicas en una construcción es uno de los recursos necesarios para garantizar que la construcción es sostenible y confortable. Proveer confort a sus habitantes es uno de los objetivos principales de una construcción. En la siguiente sección se realizará una revisión sobre las herramientas para cuantificar el estado de confort de las personas.

2.2. Confort y sostenibilidad

El confort es un término cuyo significado puede relacionarse con conceptos como bienestar, comodidad o sentirse a gusto. En las construcciones el confort es un concepto que obtiene cada vez más relevancia, esto debido al impacto que genera en la productividad, la convivencia y el estado de ánimo. Esto no es una novedad para el sector construcción, sin embargo, no es un tema relevante a la hora de construir debido a que generalmente proporcionar confort representa un compromiso económico y ambiental. Por eso, el área de investigación dirigida a proporcionar condiciones de confort, es un factor clave en el actual sector de la construcción en Colombia, donde uno de los objetivos principales es proveer estrategias para maximizar el ahorro económico, energético y proporcionar el bienestar de los usuarios [10].

Muchos autores han estudiado el problema de caracterizar y calcular la sensación de confort térmico en un entorno determinado, como resultado existen algunos índices y modelos en la literatura que permiten cuantificarlo. Entre los más populares se encuentra el índice de Voto Medio Predicho o PMV (por sus siglas en inglés), desarrollado por Fanger durante los

PMV	Sensación
+3	Caliente
+2	Cálida
+1	Ligeramente cálida
0	Confortable
-1	Ligeramente fresca
-2	Fresco
-3	Frío

Tabla 2-1.: Escala de sensación térmica. Tomado de [10]

años 70 para cuantificar el confort térmico de los humanos [19]. El índice PMV predice la respuesta media (en un sentido estadístico) sobre la sensación térmica de un gran grupo de personas expuestas a ciertas condiciones térmicas durante mucho tiempo. El valor del índice PMV es una escala de sensación térmica de siete puntos que se muestra en la Tabla 2-1. Para garantizar una situación de confort térmico en un entorno determinado, diferentes estándares recomiendan mantener el índice PMV en el nivel 0 con una tolerancia de +/- 0.5 [10].

El índice PMV se define por las variables que aparecen en la Tabla 2-2. La adquisición de la mayor parte de estas variables se realiza mediante una metodología sencilla. Sin embargo, el aislamiento de la ropa y la actividad humana son variables que no se pueden medir fácilmente, excepto en experimentos controlados. La razón principal es que dependen de la situación real de los usuarios en todo momento. La zona de confort humano, establecida por ASHRAE [10], para los sistemas de acondicionamiento de aire, se alcanza para valores promedios de las temperaturas del local, entre 22 °C y 24 °C. La expresión mediante la cual se calcula el índice PMV se presenta en la ecuación 2-1

$$\begin{aligned}
 PMV = [0,303 \cdot e^{-0,036M} + 0,028] \cdot \{ & (M - V) - 3,05 \cdot 10^{-3}[5733 - 6,99(M - V) - p_a] - \\
 & 0,42[(M - V) - 58,15] - 1,7 \cdot 10^{-5}M(5867 - p_a) - 0,0014M(34 - T_a) - 3,96 \cdot 10^{-8} \\
 & f_{cl}[(T_{cl} + 273)^4 - T_{rm} + 273]^4] - f_{cl}h_c(T_{cl} - T_a)\},
 \end{aligned} \tag{2-1}$$

donde T_{cl} corresponde a la temperatura de la superficie de la ropa y se calcula así 2-2:

$$\begin{aligned}
 T_{cl} = 35,7 - 0,028(M - V) - I_{cl}\{ & 3,96 \cdot 10^{-8}f_{cl}[(T_{cl} + 273)^4 - (T_{rm} + 237)^4] - \\
 & f_{cl}h_c(T_{cl} - T_a)\},
 \end{aligned} \tag{2-2}$$

el coeficiente de transferencia por convección h_{cl} se calcula por medio de la siguiente ecuación 2-3:

Parámetro	Símbolo	Unidad
Taza metabólica	M	W/m^2
Aislamiento por la ropa	I_{cl}	m^2C/W
Temperatura del aire	T_a	C
Temperatura radiante media	T_{rm}	C
Velocidad del aire en el interior	V_{ar}	%
Potencia efectiva mecánica	V	W/m^2
Factor de superficie de la ropa	f_{cl}	1
Coeff. de transmisión de calor por convección	h_c	W/m^2K
Presión parcial del vapor de agua	p_a	Pa
Temperatura de la superficie de la ropa	T_{cl}	C

Tabla 2-2.: Rango de validez para la cuantificación de la sensación térmica haciendo uso del índice PMV. Tomado de [10]

$$h_{cl} = \begin{cases} 2,38|T_{cl} - T_a|^{0,25} & \text{si } 2,38|T_{cl} - T_a|^{0,25} > 12,1\sqrt{V_{ar}} \\ 12,1\sqrt{V_{ar}} & \text{si } 2,38|T_{cl} - T_a|^{0,25} < 12,1\sqrt{V_{ar}}, \end{cases} \quad (2-3)$$

para calcular el factor de área de superficie de la ropa f_{cl} vea la ecuación 2-4

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,290I_{cl} & \text{si } I_{cl} \leq 0,078 \\ 1,05 + 0,645I_{cl} & \text{si } I_{cl} > 0,078 \end{cases} \quad (2-4)$$

Finalmente se define entonces el cálculo del índice de confort PMV. Aunque este índice es muy útil para conocer el estado de confort térmico de una persona, no es eficiente para estimar el índice de confort de un conjunto de personas, para esto, Fanger define el índice Porcentaje de personas insatisfechas (PPD, por sus siglas en inglés) este índice permitirá predecir el porcentaje de personas que se consideran en condición de confort térmico. Su cálculo se realiza mediante la siguiente ecuación 2-5.

$$PPD = 100 - 95e^{-0,03353PMV^4 - 0,2179PMV^2} \quad (2-5)$$

Para conocer más acerca de este índice en [13] se realiza una descripción completa del cálculo. En la siguiente sección se realiza una revisión sobre los dispositivos HVAC. Cuyo objetivo es mantener confortable el interior de la construcción.

2.3. Calentamiento y refrigeración

El sector residencial consume energía secundaria, que es aquella que se recibe en forma adecuada para ser utilizada por los sistemas consumidores para apoyar los estándares de vida de los ocupantes. Los principales grupos de uso final de energía secundaria son:

- **Calentamiento y enfriamiento del espacio:** energía requerida para soportar las pérdidas térmicas incurridas en la envolvente del edificio debido a la conducción y la radiación, así como la infiltración/ventilación del aire en un esfuerzo por mantener el espacio vital a una temperatura y aire cómodos.
- **Agua caliente doméstica:** energía necesaria para calentar el agua a una temperatura cómoda o adecuada para los usos de los ocupantes y aparatos.
- **Electrodomésticos e iluminación:** energía consumida para operar electrodomésticos comunes (p. Ej., Refrigerador y cafetera) y para proporcionar una iluminación adecuada [53].

En la revisión de la literatura se puede observar una gran cantidad de artículos enfocados al primer grupo de uso final anteriormente mencionado, es decir, a los procesos de calentamiento y refrigeración, en el sentido de realizar un análisis exergético a los equipos que conforman los sistemas de climatización HVAC.

2.3.1. Sistemas de climatización HVAC

El confort generalmente se mantiene por medio de sistemas de calentamiento, ventilación y aire acondicionado (HVAC por sus siglas en inglés). Estudios recientes muestran que aproximadamente el 40 % del consumo mundial total de energía está en los edificios [10] y el 50 % de la demanda de energía en los edificios está relacionada con la calefacción, la ventilación y el aire acondicionado [47]. Así también se explica en [49], en donde se asegura que la mayor parte de la energía utilizada en los edificios se usa para mantener temperaturas ambiente cómodas y añade diciendo que la calefacción consume hasta el 57 % de la demanda energética total de un edificio.

Así entonces, el objetivo principal de los sistemas HVAC es alcanzar el confort térmico para los usuarios de la construcción. Cabe anotar que en los países desarrollados, las personas suelen pasar el 80 % de su vida en interiores. Por lo tanto, es importante encontrar un compromiso entre el ahorro de energía y el bienestar de los usuarios [10]. En ese mismo sentido, una buena base para comparar los sistemas de calefacción y refrigeración para edificios, es su eficiencia energética [54]. Las eficiencias energéticas de los sistemas con la misma forma de producción ayudan a identificar aquellos dispositivos que están más cerca de la producción máxima ideal que se puede obtener de los procesos involucrados.

Los índices específicos que se tratan en la literatura para equipos de acondicionamiento de aire en edificaciones son [18]: eficiencia energética, eficiencia exergética, destrucción de exergía y emisiones equivalentes de CO₂ debida a la generación eléctrica. Adicionalmente, otros indicadores exergéticos relacionados con la sostenibilidad y la productividad de los mismos son: el índice de sostenibilidad, la irreversibilidad relativa, la razón de agotamiento del combustible, la falta de productividad y el factor exergético.

2.4. Modelado de elementos de generación, almacenamiento y consumo de energía eléctrica

Estudios realizados hacia el año 2013 reflejan que el sector residencial es responsable del 17% de las emisiones de CO₂ totales en el planeta [42]. Esto impactó el sector construcción en la gran mayoría del planeta, pues los arquitectos e ingenieros deberían preocuparse por incorporar estrategias en los diseños que aporten a la solución de la crisis ya presente. Una de estas estrategias se basa en generar energía eléctrica renovable para suplir parcial o totalmente la demanda energética de la construcción. Las alternativas más utilizadas comúnmente son: los sistemas fotovoltaicos, sistemas solares térmicos, sistemas de bombas de calor y la combinación de los anteriores. En la siguiente sección se detallan las alternativas antes mencionadas.

2.4.1. Sistemas fotovoltaicos

Los sistemas fotovoltaicos se convirtieron en una de las estrategias más utilizadas para recolectar energía en las construcciones residenciales. Los sistemas fotovoltaicos integrados a la construcción (BIPV por sus siglas en inglés), son una atractiva solución a los problemas energéticos, arquitectónicos y económicos [29]. Los sistemas BIPV consisten en reemplazar los materiales convencionales de construcción en fachadas, techos y ventanas por celdas solares. Para poder suplir las necesidades constructivas, se ha desarrollado tecnología en celdas solares. En cuanto a las funciones de una pared, las celdas BIPV térmicas pueden almacenar y generar energía térmica para aclimatación; las celdas semitransparentes STPV son celdas translúcidas que pueden generar energía eléctrica y permiten iluminar naturalmente interiores [5]. Como se mencionó anteriormente los sistemas BIPV brindan una solución óptima para la situación energética actual en el mundo.

Las placas solares se pueden clasificar de muchas formas. Entre ellas se encuentran tres formas de hacerlo; por tecnología, tipo de aplicación y nombres en el mercado [6].

- **Por tecnología:** esta categoría clasifica las placas solares por el material con el que fueron construidas, aquellas que fueron construidas a base de silicio y las que no. El silicio es un material que está presente en la fabricación de gran parte de los dispositivos electrónicos y las celdas solares no son la excepción. Este fue uno de los materiales

pioneros presentes en la recolección de energía eléctrica mediante placas solares y con el tiempo han venido transformándose y se han desarrollado nuevas tecnologías para mejorar su desempeño. Las placas basadas en elementos diferentes al silicio son desarrollos más recientes que carecen de la confiabilidad que proporciona la tecnología convencional, sin embargo, prometen mejorar algunas de las características de las placas como mejores coeficientes de absorción.

- **Por aplicación:** la incorporación de las placas en las fachadas y los techos, son las estrategias más utilizadas en la integración de las placas en la arquitectura de una construcción.
- **Por nombres en el mercado:** esta categoría se subdivide en otras cuatro; productos BIPV de baldosa, productos BIPV de aluminio, productos BIPV por módulos y productos de acristalamiento de células solares [29]. Los productos BIPV de baldosa se utilizan para cubrir los tejados, se diseñan con la intención de que se vean estéticos y prácticos. Los productos BIPV de aluminio comúnmente se diseñan en películas delgadas que proveen flexibilidad y maleabilidad para las superficies de los tejados. Los productos BIPV por módulo son similares a los módulos fotovoltaicos convencionales, la diferencia radica en la capacidad de estos para brindar soluciones arquitectónicas para brindar confort.

Información del artículo			Modelo			Parámetros	Metodología de optimización	Comentarios
Autores	Año	Ubicación	Único diodo	Doble diodo	Modular			
[63]	2020	China	x	x	x	$I_{ph}, I_d, R_s, R_{sh}, n$ $I_{ph}, I_{d1}, I_{d2}, n_2, R_s, R_{sh}$ I_{ph}, I_d, R_s, R_{sh}	Metaheuristic algorithm named generalized normal distribution optimization (GNDO)	El método propuesto fue implementado en los tres modelos y presento buenos resultados
[30]	2020	Morocco		x		$I_{ph}, I_{d1}, I_{d2}, n_1, n_2, R_s h$	Metodo de Brent	-
[40]	2019	India	x			R_s, R_{sh}, n	Algoritmo de optimización GWO	Mejor comportamiento frente a diferentes algoritmos de optimización
[60]	2018	Iran		x		$I_{ph}, I_{d1}, I_{d2}, R_s h$	Modelo analítico y numérico	-
[28]	2010	Malaysia		x		$I_{ph}, I_{d1}, R_s, R_s h$	Modelo analítico	Probado en 6 tipos de paneles y mejores resultados en sus comparaciones. Las dos corrientes de los diodos son igualadas
[34]	2010	Italy	x			$I_{ph}, I_d, R_s, R_{sh}, n$	Modelo analítico	De fácil implementación
[51]	2020	China	x			$I_{ph}, I_d, R_s, R_{sh}, n$	MPPCEDE: Multi-population parallel co-evolutionary differential evolution	Diversidad de población, convergencia rápida, eficiencia de búsqueda y capacidad de exploración

Tabla 2-3.: Resumen de los desarrollos de modelos revisados

Revisión de modelos eléctricos

Los fabricantes de paneles fotovoltaicos proveen tablas en las que se encuentra información sobre la potencia entregada por el panel según la temperatura, sin embargo, esta información no es confiable [63]. Por esta razón es necesario estimar el comportamiento eléctrico del panel solar. Para poder hacerlo, existen diversas metodologías, entre ellas, metodologías estocásticas, probabilísticas, determinísticas y algunas que involucran inteligencia artificial. En esta revisión se profundizará en la metodología determinística en la que se homologa el comportamiento de las variables eléctricas de la placa a tres tipos de circuitos: modelo de único diodo, modelo de doble diodo y modelo modular tal y como se muestra en la Figura 2-1.

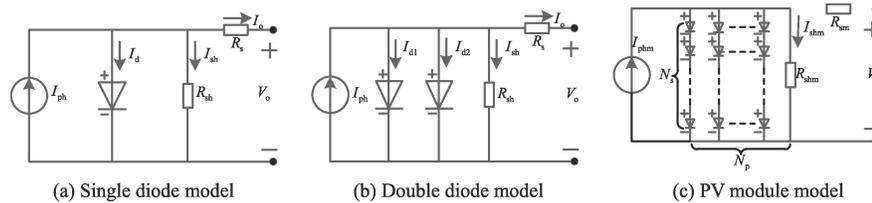


Figura 2-1.: Diagramas de modelos eléctricos

I_{ph} : representa corriente foto generada.

I_{sh} : representa las corrientes parásitas debidas a las resistencias de derivación.

I_d : representa la corriente de diodo que se puede modelar mediante la ecuación de Shockley para un diodo ideal.

I_{d1} ; representa la corriente que pasa por el primer diodo.

I_{d2} ; representa la corriente que pasa por el segundo diodo.

n, n_1, n_2 : representan las constantes ideales de los diodos.

Los desarrollos hasta la fecha sobre este tema consisten en utilizar alguno de los modelos determinísticos mencionados anteriormente como base e implementar otra estrategia para parametrizarlos. En la Tabla 2-3 se resumen algunos estudios realizados en el desarrollo de modelos para paneles fotovoltaicos. La información se segmenta por autor, año de publicación, lugar en el que fue realizado el artículo, el modelo utilizado, los parámetros estimados correspondientes al diagrama 2-1, estrategia implementada para estimar los parámetros y comentarios en los que se resaltan datos relevantes del estudio.

2.4.2. Sistemas solares térmicos

Los sistemas solares térmicos son los segundos en orden de relevancia en estrategias para la recolección de la energía solar. Para estos sistemas se han desarrollado diversas configuraciones en los dispositivos que se ajustan a todas las necesidades. Los SST cuentan con los

niveles más altos de eficiencia de absorción de radiación dentro de las tecnologías de aprovechamiento de energía solar [25]. El objetivo general de los SST es absorber la radiación solar para calentar un fluido, posteriormente el fluido se almacena y es bombeado para diversos usos finales: aclimatación de interiores, agua caliente domestica de uso final o procesos industriales. Dentro de los sistemas solares térmicos se destacan cuatro elementos: 1. Colectores térmicos, 2. Tanques de almacenamiento térmico, 3. Bombas y 4. Intercambiadores de calor.

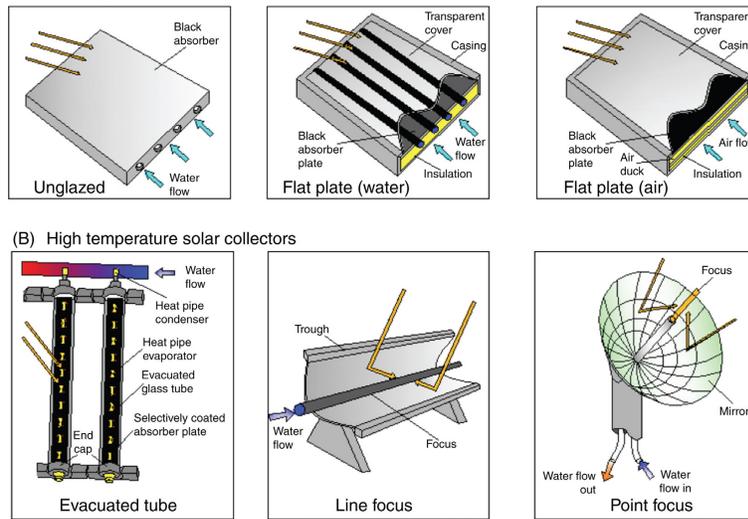


Figura 2-2.: Sistemas solares térmicos, tomado de [8]

1. Colectores térmicos

Los colectores térmicos son dispositivos cuyo objetivo principal es transducir la radiación emitida por el sol en energía térmica y existen diferentes configuraciones: colectores de placa plana, tubos de vacío y colectores de punto y línea de concentración, ver fig 2-2 . Dentro de esta categoría, los colectores de placa plana son los protagonistas. Estos están generalmente compuestos por cuatro elementos: un absorbedor formado generalmente por una lámina de metal con alta capacidad de conducción térmica que tiene como función interceptar la radiación solar en el interior del captador y transformar la energía solar en energía térmica [17]. Cuenta también con una cubierta transparente que tiene la función de aislar el colector solar de las condiciones ambientales exteriores dejando pasar la radiación solar. Otro componente se encarga de aislar el absorbedor del exterior para evitar pérdidas de calor. Por último, cuenta con unas carcass en el que se alojan el resto de los componentes antes mencionados. A continuación, se presentan dos herramientas para modelar los colectores términos solares: los modelos de estado estacionario y los modelos dinámicos. En [15] se propone un modelo de estado estacionario para evaluar la eficiencia de un colector en función de la temperatura del fluido de entrada, la radiación total incidente y la temperatura ambiente.

$$n = \frac{Q_u}{GA_c} = n_0 - C_1 \frac{T_i - T_a}{G} - C_2 \frac{(T_i - T_a)^2}{G},$$

donde A_c es el área de colector, C_1 es el coeficiente de pérdida de primer orden, C_2 es el coeficiente de pérdida de segundo orden, Q_u es la potencia de salida del colector, T_i es la temperatura de entrada del fluido del colector, n es la eficiencia del colector y n_0 es el intercepto de la curva de eficiencia del colector.

En [41] se propone un modelo dinámico en el que se consideran tres nodos de temperatura: el primero es la cubierta transparente, el absorbedor y la del fluido. Las ecuaciones de balance térmico que gobiernan el colector son:

Cubierta transparente

$$m_g C_{pg} \frac{dT_g}{dt} = Q_1 + Q_2 - Q_3 - Q_4$$

,

donde:

$Q_1 = \alpha_g A_{ge} G_n$: energía solar absorbida por el absorbedor.

$Q_2 = A_r \epsilon_r \sigma (T_r^4 - T_g^4)$: radiación intercambiada entre el absorbedor y la cubierta.

$Q_3 = A_g \epsilon_g \sigma (T_g^4 - T_s^4)$: calor irradiado hacia el cielo.

$T_s = 0,0552 T_a^{1,5}$: Temperatura del cielo.

$Q_4 = A_g h_{ga} (T_g - T_a)$: pérdidas de calor hacia el ambiente.

Absorbedor

$$m_r c_{pr} \frac{dT_r}{dt} = Q_5 - Q_2 - Q_6,$$

donde:

$Q_5 = \tau_g \alpha_r A_{re} G_n$: energía transmitida por la cubierta transparente y absorbida.

$Q_5 = \tau_g \alpha_r A_{re} G_n$: energía transmitida por la cubierta transparente y absorbida.

$$Q_6 = \beta \dot{m}_f c_{pf} [1 - \exp(-\frac{h_{fr} A_t}{\dot{m}_f c_{pf}})] (T_r - T_{1f}) : \text{energía transportada por el fluido.}$$

Los subíndices g, s, r, f, a representan la cubierta transparente, el cielo, el absorbedor, el fluido y el ambiente exterior respectivamente. Los parámetros $\alpha, A_{re}, G_n, h, c_p, A, \dot{m}, \epsilon, \sigma$ y τ representan la absorptividad de la radiación solar, el área del absorbedor expuesta a la radiación solar, la radiación global, el coeficiente de transferencia, calor específico, el área, la tasa de flujo de masa, emisividad infrarroja, la constante Stefan-Boltzmann y la transmitancia de radiación solar respectivamente.

Se han desarrollado diferentes estrategias para estimar el comportamiento de colectores térmicos. En [61] se desarrolla un modelo matricial con parámetros variables para un colector de placa plana, el modelo cuenta con la radiación, temperatura ambiente, temperatura del fluido de entrada y el flujo masico de entrada como variables de entrada para estimar la temperatura del fluido de salida del colector. Este estudio se realizó en Zhangjiakou, Provincia de Hebei. En [14] se propone un modelo basado en una red neuronal para un colector de placa plana. El modelo cuenta con la radiación, la temperatura ambiente, la temperatura del fluido de entrada y flujo del fluido de entrada como variables de entrada para estimar la temperatura del fluido de salida. En el trabajo se prueban tres fluidos de trabajo y el modelo presenta errores aceptables en todos los casos.

2. Tanques de almacenamiento térmico

Los tanques de almacenamiento térmico son recipientes que se usan en los sistemas solares térmicos para almacenar fluidos que generalmente provienen de los colectores y se encuentran a altas temperaturas. Estos recipientes tienen características especiales: cuentan con una alta tasa de transferencia térmica entre el fluido proveniente del colector y el medio de

almacenamiento; bajas pérdidas térmicas, energéticas y exergéticas; facilidad de regulación y control; y son mecánica y químicamente estables. Para modelar las dinámicas de un almacenador no existen muchas estrategias en la literatura y es común modelarlos como en [5] donde la capacidad de almacenamiento de energía de un fluido a temperatura uniforme está dada por:

$$Q_s = (mC_p)_s \Delta T_s.$$

Y el balance energético esta dado por la expresión:

$$(mC_p)_s \frac{dT_s}{dt} = Q_u - \dot{L}_s - (UA)_s (T_s - T_a'),$$

Donde Q_u y \dot{L}_s son las tasas de adición desde el colector y de sustracción hacia la carga. El sistema de almacenamiento térmico descrito anteriormente es el más sencillo y corresponde a un tanque no estratificado. Existen diferentes configuraciones con múltiples tanques estratificados con diferentes cantidades de nodos que aumentan la capacidad térmica y la eficiencia. En la literatura se pueden encontrar modelos numéricos aplicados a tubos con aleta a gran escala [57] con un buen ajuste y versatilidad para aplicarlo en diferentes escenarios. En [3] se hace un interesante planteamiento de un modelo en el que se consideran como entrada, las condiciones climáticas y las dinámicas del colector solar, convirtiéndose en una herramienta útil para proporcionar una idea sobre el tamaño óptimo de la planta y la producción que reduce el trabajo significativo para las fases preliminares del diseño.

3. Bombas de calor

Las bombas de calor son una tecnología destacada en el contexto de las construcciones sostenibles, son sistemas capaces de adquirir calor del aire o de la tierra. Las bombas de calor se encuentran entre las herramientas de transformación de energías renovables más eficientes, sin embargo, una bomba que ofrezca cargas importantes de calor, debe estar ubicada entre 50m y 70m bajo el suelo [5], lo cual implica un alto gasto económico. Por esta razón en la literatura se encuentran metodologías de diseño con énfasis en el dimensionamiento económico y de carga térmica. En [20] se presentó un modelo que combina un sistema de extracción de calor geotérmico con bomba asistido por energía solar con un modelo simplificado de transferencia de calor terrestre para determinar el rendimiento del sistema a largo plazo. Este trabajo tuvo como uno de sus objetivos el determinar el impacto económico de la implementación del sistema. El modelo propuso un modelo de masa térmica para predecir la temperatura del suelo en el tiempo como función de la construcción y variables climáticas. En [23] se realizó un análisis de desempeño y económico de una bomba de calor geotérmica mediante un indicador planteado por los autores. Los análisis económicos tienen como indicador el valor presente neto y los análisis de desempeño están relacionados con el calor producido para satisfacer los requerimientos térmicos para el confort de una construcción.

Sistemas integrados

Cada una de las herramientas mencionadas anteriormente representan una fuente de energía térmica o eléctrica que representan impactos ambientales casi nulos. Por esta razón, las construcciones sostenibles están compuestas por una de estas herramientas o por la combinación de ellas. El interés del mundo por el desarrollo sostenible viene desde los años setenta tras la crisis del petróleo, desde allí se empezaron a plantear dudas sobre el desarrollo económico del mundo y de cómo este nos llevaría a nuestra propia destrucción. Por esto, en los años setenta tras la crisis del petróleo, la Agencia Internacional de la Energía (AIE) es creada por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE). AIE desarrollo un programa en 1977 llamado Energía en Edificios y Comunidades (EEC) y la función de este es realizar investigaciones y proporcionar un enfoque internacional para la eficiencia energética de los edificios. Hacia el 2014 se realizó una revisión de los avances en las tecnologías en los países involucrados en la organización y se recopiló la información de 30 casos de estudio. La revisión surgió de los objetivos de la tarea número 40 del anexo 52 del proyecto hacia edificios solares de energía neta cero [22]. Algunos de estos casos de estudios están resumidos en la Tabla 2.4.2.

Nombre del proyecto	Ubicación	Necesidad térmica	Suministro / Demanda (kWh/m ² año)	Generación de calor pasiva				Elementos de generación		Almacenamiento	
				Techo Valor-U / %	Paredes Valor-U / %	Ventanas Valor-U / %	Piso Valor-U / %	Eléctrica	Térmica	Térmico	Electrico
LYCEE KYOTO HIGH SCHOOL	Francia	CYE	0.96	0.19/20 %	0.17/15 %	1.3/43 %	0.19/22 %	PV/Techo	BIO	x	
Liméil Brévanne	Francia	CYE	0.5	0.19/-	0.19/-	1.2/-	0.27/-	BIPV/Techo	BC, CPP		
Primary School of Laion	Italia	CYE	2.5	0.14/14 %	0.22/19 %	0.78/41 %	0.24/26 %	BIPV/Techo	BC, CPP		
Alpine Refuge - Schiestlhaus	Austria	CYE	0.5	0.12/16 %	0.13/33 %	0.7/27 %	0.19/23 %	BIPV/Techo	BIO, CPP	x	
EnergyFlexHouse	Dinamarca	C	0.21	0.09/16 %	0.08/26 %	0.79/42 %	0.11/16 %	PV/Techo	BC, CPP	x	
Leaf House	Italia	CYE	0.70	0.25/26 %	0.15/30 %	0.86/17 %	0.41/27 %	BIPV/Techo	BC, CPP	x	
Casa Zero Energy House	Italia	CYE	6.535	0.20/16 %	0.20/24 %	0.9/34 %	0.37/27 %	BIPV/Techo	BC, BIPV/T		
Single Family Building (Riehen)	Suiza	CYE	1.33	0.11/14 %	0.13/24 %	0.81/49 %	0.1/13 %	PV/Techo	BC, CPP		

Tabla 2-4.: Revisión casos de estudio ISC-EBC Task 40 Annex 52. BC, Bomba de Calor; Valor U, valor de admitancia térmica; BIO, Bioreactor; CYE, Calentar y enfriar; C, Calentar.

De la Tabla 2.4.2 se puede concluir que los sistemas de almacenamiento térmico están presentes en la mayoría de los casos, así como las bombas de calor. Los paneles fotovoltaicos están presentes en todos los casos de estudio y la tecnología BIPV está incluida en cinco de los ocho casos revisados. El valor de admitancia está directamente relacionado con las necesidades térmicas de la construcción. Una correcta planeación del diseño activo y pasivo de una construcción generalmente involucra una optimización en donde los objetivos de optimización apuntan mejorar uno o varios de los indicadores de sostenibilidad, en la siguiente

sección se realizará una revisión en la literatura de las estrategias de optimización han sido propuestas.

2.5. Esquemas de optimización en el contexto de construcciones sostenibles

Para aportar a la disminución del consumo energético en una construcción existen principalmente dos enfoques: el primero está centrado en utilizar los materiales de construcción ideales para las condiciones ambientales, enventanado, orientación y sombreado para proporcionar el mayor confort posible sin la intervención de fuentes de calor artificial, a esto se le llama intervención en el diseño pasivo; el segundo consiste en optimizar el uso de dispositivos que aportan o extraen calor de manera artificial de la construcción, a esto se le llama intervención en el diseño activo.

Para poder determinar el impacto de las estrategias relacionadas con el diseño pasivo, en [55] se hizo un estudio para cuantificar la reducción en el consumo energético e impactos ambientales de forma simultánea. Estas estrategias consisten en cambiar la orientación de la construcción, sombreado, entechado, el enventanado y el aislamiento de los materiales constructivos. En el estudio se encontraron las características óptimas de los componentes pasivos de la construcción y se demostró que un correcto diseño pasivo conlleva a una disminución de hasta el 40% en el consumo energético. Cabe además mencionar que todas las mejoras realizadas en el diseño pasivo de una construcción impactarán positivamente en la reducción del uso de componentes activos, como los acondicionadores térmicos y la iluminación. También en [7] proponen una metodología para renovar la envolvente térmica de un colegio. En esta metodología se realiza un análisis de costo de ciclo de vida de la construcción y se plantea una relación directa entre este y el diseño pasivo de la construcción.

En la revisión de literatura presentada hasta ahora, se puede identificar que el método más usado para encontrar un óptimo involucra una optimización, por esto, en la tabla **2-5** se resume el aporte realizado por 6 autores y los caracteriza en 5 categorías:

- Algoritmo de optimización: corresponde al algoritmo de optimización utilizado para encontrar los óptimos. Esta característica puede ser fundamental para identificar altas no linealidades si es que se implementan muchos algoritmos basados en inteligencia artificial en la literatura.
- Software de optimización: corresponde a la herramienta de software utilizada para llevar a cabo la optimización.
- Objetivos de Optimización: Identificar los objetivos de optimización populares puede ser útil para identificar brechas en la literatura.

2.5 Esquemas de optimización en el contexto de construcciones sostenibles

- Software de modelado: corresponde a la herramienta utilizada para modelar la construcción, este software puede considerar el modelo arquitectónico o únicamente la herramienta matemática para estimar las dinámicas térmicas y energéticas en la construcción.
- Año de publicación: Año en el que fue publicado el documento.

Autores	Algoritmo de optimización	Software para la optimización	Objetivos de optimización	Software de modelado	Año de publicación
[7]	NSGA-II	Python	Consumo energético y temperatura	EnergyPlus	2017
[12]	ABC	jEPlus + MATLAB	PPD y consumo energético	EnergyPlus	2016
[26]	ANN y GA	-	Consumo energético	EnergyPlus	2020
[50]	NSGA-II	-	Evaluación de ciclo de vida y consumo energético	REVIT	2019
[62]	BBMOPSO	MATLAB	PPD y consumo energético	EnergyPlus	2020
[4]	GA	MATLAB	Horas de ausencia de confort, consumo de energía primaria y costo de los elementos relacionados con la energía	EnergyPlus	2019

Tabla 2-5.: Revisión de metodologías de optimización observadas en la literatura

De la tabla **2-5** se puede destacar que todos los algoritmos de optimización empleados por los autores son basados en inteligencia artificial. Esto puede deberse a diferentes razones, entre estas se resaltan dos: Los modelos energéticos de las construcciones son no lineales o el modelo térmico se encuentra embebido en un software diferente al de la optimización, por lo tanto, se debe tratar como un modelo de caja negra. El software de modelado más usado es el software EnergyPlus. Según los años en los que fueron publicados los artículos, se puede

concluir que actualmente se está investigando sobre diferentes metodologías para diseñar construcciones sostenibles. En los papers analizados, el consumo energético está presente en todos los objetivos de optimización.

2.6. Modelado matemático para la predicción del consumo de energía

Las técnicas utilizadas para modelar el consumo de energía residencial se pueden agrupar en dos categorías, Top-down y Bottom-up. La terminología es con referencia a la posición jerárquica de las entradas de datos en comparación con el sector de la vivienda en su conjunto. Los modelos de arriba abajo utilizan la estimación del consumo total de energía del sector residencial y otras variables pertinentes para atribuir el consumo de energía a las características de todo el sector de la vivienda. En contraste, los modelos de abajo hacia arriba calculan el consumo de energía de individuos o grupos de casas y luego extrapolan estos resultados para representar la región o la nación. Las agrupaciones de técnicas descendentes y ascendentes para modelar el consumo de energía residencial se muestran en la Figura 2-3 [53].

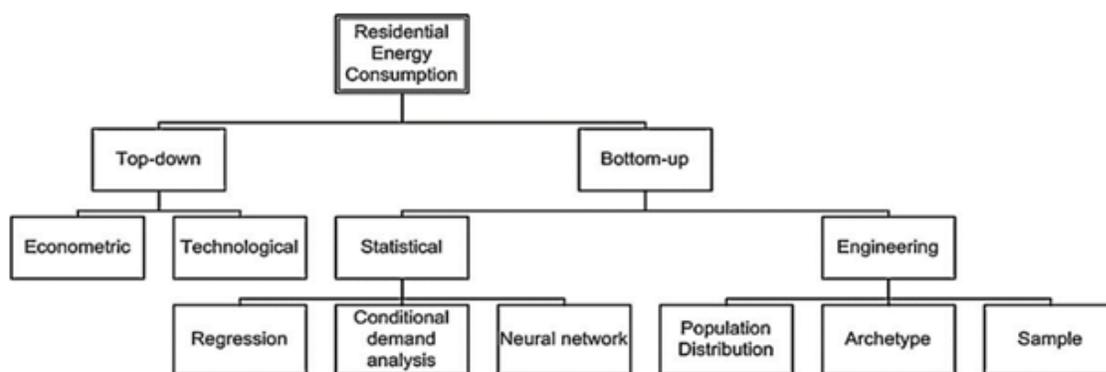


Figura 2-3.: Agrupaciones de técnicas ascendentes y descendentes. Tomado de [53]

Los enfoques de “arriba hacia abajo” y de “abajo hacia arriba” tienen similitudes y diferencias, así como ventajas y desventajas. Dos de los problemas más críticos que caracterizan estos enfoques son la información de entrada requerida y el rango deseado de escenarios modelados [53].

Además de los métodos recientemente indicados, otros estudios también mencionan técnicas estadísticas como la regresión, para determinar los coeficientes del modelo correspondientes a los parámetros de entrada [53]. Dichos coeficientes pueden tener o no interpretación física. El método CDA (Análisis de Demanda Condicional) y por último las Redes Neuronales que utiliza un modelo matemático simplificado. La técnica permite que todos los usos finales se afecten entre sí a través de una serie de “neuronas” paralelas. Cada neurona tiene un término

de sesgo y una serie de coeficientes que se multiplican por el valor de las neuronas de la capa anterior.

Otro método usado para modelar el consumo energético en las construcciones es el llamado Método de Ingeniería o EM (por sus siglas en inglés), este método toma en cuenta el consumo de energía de los usos finales según sus calificaciones o características. El EM es el único método que puede desarrollar completamente el consumo de energía del sector sin ninguna información histórica sobre el consumo de energía. Los modelos pueden ser tan simples como una estimación en función del clima o tan detallados como un completo análisis termodinámico y de transferencia de calor en todos los usos finales dentro de la vivienda. Como funciona según la física de los usos finales, el ME tiene el mayor grado de flexibilidad y capacidad con respecto al modelado de nuevas tecnologías que no tienen datos históricos de consumo. Sin embargo, el comportamiento del ocupante debe ser asumido. Como el comportamiento del ocupante varía ampliamente, esto es difícil de estimar, [53].

2.7. Evaluación de costos y cuantificación económica de los elementos de la construcción sostenible

La sostenibilidad se refiere, por definición, a la satisfacción de las necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer las suyas, garantizando el equilibrio entre crecimiento económico, cuidado del medio ambiente y bienestar social. (Triviño, C. 2008 - Consejo Colombiano de Construcción Sostenible) define una construcción sostenible como la práctica de realizar una planeación, un diseño, una construcción, y operación, con el fin de tener un lugar habitable de proyectos integrales de construcción que generen un impacto positivo para el ambiente, los usuarios y la comunidad. La sostenibilidad es fundamentalmente entonces un concepto soportado por tres pilares; el ambiental, el económico y el social. Entonces cuando se habla sobre evaluación o valoración en una construcción sostenible, se deben tener en cuenta estos tres factores [56].

El enfoque económico en una construcción sostenible consiste en identificar a la economía como un subsistema dentro del sistema ecológico global que debe respetar límites impuestos por el bienestar del medio ambiente y el de la comunidad que contiene al subsistema [36]. Aclarado el concepto de economía en este entorno sostenible, existen metodologías ya establecidas para evaluar y cuantificar económica, social y medioambientalmente una construcción. En [11] se desarrolla un modelo para describir el ciclo de la construcción en Colombia, este modelo describe el proceso completo de una construcción en términos económicos, desde la compra del área en pre-venta hasta la venta de la construcción; además comprende las dinámicas de las intervenciones del estado en términos de impuestos, subsidios, etc. Aunque es una estrategia interesante para la evaluación de los costos, existen estrategias que son más utilizadas en este contexto. LCA (acrónimo de Life Cycle Assessment) es una herramienta que se utiliza para evaluar los recursos de impacto ambiental utilizados de un producto,

servicio o proceso considerando la perspectiva del ciclo de vida, es decir, desde las fases de adquisición, producción y uso de la materia prima, hasta la gestión de residuos [56]. Esta herramienta está regulada por la norma ISO 14040, esta indica la forma de usarla e interpretarla. LCC (acrónimo de Life Cycle Cost) es una herramienta que contabiliza todos los costos relacionados al ciclo de vida de un producto, la norma ISO 55000 regula esta herramienta. En vista de que no hay herramientas estandarizadas para incorporar el efecto social, se están desarrollando nuevas herramientas que lo hacen. Por parte del pilar social, ha sido difícil cuantificar su impacto. En [32] se desarrolla una herramienta, SLCA (acrónimo Social Life Cycle Assessment) para cuantificar los impactos sociales de la construcción. Por último para tener un indicador de sostenibilidad global [56] y [32] proponen una herramienta llamada LCSA (acrónimo de Life Cycle Sustainability Assessment), una herramienta para generar un solo indicador que comprenda los tres.

$$LCSA = LCA + LCC + SLCA$$

Por último para catalogar una construcción como sostenible legalmente, se han desarrollado sellos de certificación que verifican el cumplimiento de algunos indicadores de sostenibilidad como: el uso eficiente del agua y la energía, materiales y recursos, calidad ambiental, innovación y diseño, tanto en la fase de diseño como en la fase de construcción, puesta en marcha y utilización de la edificación [48] Algunos de los certificados son descritos a continuación:

- BREEAM: Creado en 1990 por el Building Research establishment (BREE) del Reino Unido. Este sello es un instrumento que comprueba la sostenibilidad de las edificaciones, nuevas y existentes y se centraliza en los impactos de las edificaciones en su medio. El cual, presenta otra rama que está ligada a ella que determina el desarrollo urbano, denominada “BREEAM Communities.
- GREEN STAR: Creada en 2003 por el Consejo Australiano de Construcción Sostenible, está enfocado en LEED y en BREEAM. Determina el diseño ambiental a su vez la construcción de los edificios y examina las medidas estándares.
- LEED (acrónimo de Leadership in Energy Environmental Design) (U.S. Green Building Council). Creado en el año 1998, es un sistema de certificación de edificios sostenibles, que se adelantó por el Consejo de la Construcción Verde de Estados Unidos. Fue, utilizándose en varios países desde entonces. Se compone de un conjunto de normas sobre el empleo de estrategias dirigidas a la sostenibilidad en edificios de todo tipo. Se encuentran cuatro estados de certificación: LEED Certificate, LEED Silver, LEED Gold y LEED Platinum.

Después de revisar el estado del arte sobre construcciones sostenibles, se puede realizar las siguientes conclusiones:

- El indicador de confort que se utilizará en la tesis será el diseñado por Fanger, el voto medio previsto (PMV) y el porcentaje de personas insatisfechas (PPD).
- Con el fin de acotar el problema, no se realizará un análisis sobre los dispositivos activos de almacenamiento, generación o gestión de energía eléctrica o térmica. Esto debido a que cada uno de ellos representa altos niveles de complejidad y requieren de un análisis en detalle.
- Concerniente a los esquemas de optimización revisados, todos presentan algoritmos de naturaleza metaheurística en su implementación. Esto debido a que en las metodologías de optimización revisadas, el software que contiene el modelo de la construcción es externo al software en el que se está realizando la optimización.
- Los valores de admitancia, capacitancia y resistencia térmica son comunmente utilizados para caracterizar las propiedades térmicas de la construcción y relacionar el contexto climático de la zona con la misma.

Con estas conclusiones obtenidas tras la revisión del estado del arte, en el siguiente capítulo se realizará la descripción de la metodología de modelado matemático de zonas térmicas que se utilizará en la tesis.

3. Metodología para el modelado matemático de zonas térmicas

El modelado de una zona térmica es un procedimiento que involucra el procesamiento y en algunas ocasiones la predicción de variables climáticas, información acerca del comportamiento de los habitantes en la construcción y características físicas de la construcción y sus alrededores. Por esta razón antes de adentrarse en el modelado matemático de la zona térmica, en la siguiente sección se definirán algunos conceptos básicos.

3.1. Conceptos importantes para el modelado matemático de zonas térmicas

El proceso de elaboración de una construcción sostenible ha venido evolucionando en el transcurso del tiempo, al principio, las estrategias para acercarse a este concepto consistían principalmente en la selección de materiales de construcción con capacidades termoaislantes y reflectivas. Actualmente el proceso de diseño de una construcción sostenible evolucionó hacia una metodología que consiste en el desarrollo de dos diseños: el diseño pasivo y el diseño activo.

El diseño pasivo es una forma de proyectar edificios aprovechando las características medioambientales existentes para reducir al máximo el consumo de energía necesaria para ser habitables. Este diseño se centra en los módulos pasivos del edificio, es decir, en los componentes y materiales constructivos, el enventanado, el acristalado, la orientación y la ubicación geográfica. El objetivo de este enfoque es transformar la energía entregada por los fenómenos naturales como la radiación solar y el viento para acondicionar térmicamente los espacios y brindar confort.

El diseño activo es un amplio término en el que se agrupan todos los dispositivos que consumen energía eléctrica para su funcionamiento o aquellos que generan energía eléctrica. En esta tesis este término hará referencia principalmente a las diferentes estrategias de operación para los dispositivos de aclimatación térmica (HVAC). Estas estrategias comprenden metodologías de control, optimización, planeación y gestión de estos dispositivos.

Para que el diseño pasivo y activo de una construcción sean efectivos, se deben tener en cuenta variables y parámetros climáticos y cómo estos interactúan con las características de la construcción. A continuación se presenta una revisión de estos conceptos.

3.1.1. Diseño pasivo en una construcción

Un buen diseño pasivo es fundamental para que los ocupantes permanezcan térmicamente cómodos con un mínimo de calefacción o refrigeración auxiliar en el clima donde están ubicados. El espectro de condiciones climáticas en el mundo es diverso y es necesario incluir su impacto en el desempeño térmico de la construcción. De esta forma se fijan los objetivos y se toman decisiones sobre el diseño. Existen principios de donde parten las estrategias de diseño pasivo de una construcción sostenible: la envolvente térmica de la construcción, la orientación, las masas térmicas, el aislamiento, el sombreado y el enventanado.

La envolvente térmica de la construcción

La envolvente de un edificio se describe cómo la combinación del techo, las paredes, las ventanas y los pisos de una casa ayuda a aislar la atmósfera dentro del edificio de la atmósfera exterior. Una envolvente térmica ajustada es muy importante si se desea controlar la ganancia de calor en los meses de verano más calurosos y la pérdida de calor en los meses de invierno más fríos. En ocasiones tener una envolvente térmica ajustada no garantiza óptimas condiciones de confort, es probable que también necesite algún tipo de ventilación mecánica para controlar cuidadosamente la calidad del aire de su hogar.

Orientación

Elegir cuidadosamente la dirección en la que se enfrenta la construcción y la ubicación en el lote promueve el aprovechamiento de las características climáticas como el sol y la brisa fresca. Por ejemplo, en todos los climas, excepto en el tropical, las salas de estar idealmente deberían estar orientadas hacia el norte en el hemisferio sur, o lo más cerca posible al norte, lo que permitiría una exposición máxima al sol y sombrear fácilmente las paredes y ventanas en verano. Una buena orientación reduce la necesidad de calefacción y refrigeración auxiliares y mejora el acceso solar a los paneles para energía solar fotovoltaica y agua caliente. Por lo tanto, la construcción será mas cómoda para vivir y más barata de administrar. El cálculo de la orientación tiene en cuenta las variaciones de verano e invierno en la trayectoria del sol, así como la dirección y el tipo de vientos.

Sombreado

Parte de un buen diseño pasivo implica controlar cómo un edificio absorbe el calor, pero otra parte debe garantizar que pueda mantener el calor alejado de las partes estratégicas de su casa cuando sea necesario. Elementos como aleros, toldos y pérgolas cuidadosamente diseñados pueden ayudar con esto. La fachada expuesta al sol debe estar correctamente sombreada, o equipada con voladizos dimensionados, para evitar el sobrecalentamiento y mantener fresca la casa durante los meses de verano. Sin embargo, se debe realizar un diseño cuidadoso del dispositivo para garantizar que el tamaño y la pendiente (si es necesario) puedan satisfacer la

necesidad de dejar entrar el sol durante el invierno y dar sombra al edificio durante el verano. El tipo de sombra y su grado siempre está relacionado con la posición del sol y la geometría del edificio. Por ejemplo, para una vivienda ubicada en latitudes norte, los voladizos simples son muy eficientes para sombrear el edificio en la fachada sur durante el verano cuando el sol está alto en el cielo. Sin embargo, este tipo de dispositivo de sombreado no es eficaz para la fachada suroeste a la hora de bloquear la entrada del sol al interior durante las horas de la mañana y la tarde, cuando el sol está bajo en el cielo. Dicho esto, para diseñar un dispositivo de sombreado adecuado es necesario comprender cómo se mueve el sol a lo largo del año y qué efecto tienen sus ángulos en el edificio. Los ángulos de altitud y azimut representan la posición del sol en el cielo. Debido a que los dispositivos de sombreado pueden tener un gran impacto en la apariencia del edificio, además de reducir la demanda de enfriamiento, deben ser considerados y evaluados en la etapa inicial del proceso de diseño para que sean efectivos tanto en el aspecto técnico como visual, es decir, deben estar bien integrados en toda la arquitectura.

Aislamiento

El aislamiento actúa como una barrera al flujo de calor, reduciendo la pérdida de calor en invierno para mantener la casa caliente o reduciendo la ganancia de calor en verano para mantener la casa fresca. En términos de eficiencia energética es necesario remarcar que el aislamiento inadecuado y las fugas de aire son las principales causas de pérdida de calor en los hogares. En consecuencia, existen materiales de construcción diseñados para aislar cuyas propiedades térmicas dependen de los objetivos de diseño. Al especificar los materiales de aislamiento, la consideración clave es el rendimiento térmico del material durante la vida útil del edificio.

Masa térmica

El concepto de masa térmica se refiere a un material sólido o líquido que absorbe y almacena calor y lo libera cuando se necesita. De esta manera, el exceso de ganancia de calor solar se puede almacenar y utilizar cuando el sol no brilla o donde no hay sol en absoluto, como durante la noche. En realidad, funciona como una batería porque durante la temporada de verano absorbe el calor manteniendo la casa cómoda, mientras que en invierno almacena el calor ganado y lo devuelve por la noche manteniendo la casa caliente.

Enventanado

Las superficies acristaladas juegan un papel importante en una construcción pasiva porque sirven como colectores solares que aportan luz y calor a la vez que proporcionan ventilación natural. La ubicación de las ventanas, en relación con el paisaje, el viento y el movimiento del sol, puede aumentar efectivamente la eficiencia energética y proporcionar un buen confort

interno. Además, el tipo de acristalamiento es una característica clave considerando los problemas de aislamiento. Por esa razón, algunos estándares recomiendan usar el doble (o el triple si es necesario, según la ubicación) acristalamiento que ayuda a reducir las pérdidas de calor a través de las ventanas. El acristalamiento debe tener un vidrio de baja emisividad, que incluye un revestimiento de óxido metálico, en uno de los cristales internos, junto al hueco. A través de eso, el acristalamiento puede dejar entrar la luz del sol y el calor, mientras que al mismo tiempo bloquea el calor para que no salga del espacio interior.

En la sección 3 se entenderá como todos estos conceptos se tienen en cuenta matemáticamente a la hora de realizar el diseño pasivo de una construcción.

3.1.2. Diseño activo en una construcción

Para aclarar la diferencia entre diseño activo y pasivo, en [35] se definen dos categorías para que un dispositivo esté contemplado en el diseño activo de una construcción.

La primera categoría reúne a todos los dispositivos activos incorporados en la construcción que deben utilizar activamente energía para gestionar la carga de refrigeración o calefacción de la envolvente y el interior o la carga de iluminación natural artificial interior, reduciendo directamente la demanda en los sistemas centrales de HVAC y, a menudo, reemplazando su función. La segunda categoría está conformada por los dispositivos activos que transducen energías renovables en energía útil para la operación de la construcción.

En la literatura se pueden encontrar múltiples estrategias de diseño activo en una construcción, la mayoría consisten en la gestión y la operación de equipos HVAC e iluminación. Estas estrategias son diversas tanto en el esquema de control automático del dispositivo como en el procedimiento de selección del dispositivo que se ajuste a las características de la construcción.

En [46] se propone un enfoque de control predictivo para sistemas de calefacción en una oficina. En este trabajo, los autores proponen un modelo de control predictivo estocástico que nombran controlador SBMPC (Scenario-Based Model Predictive Control). Uno de los aportes más significativos de este trabajo es utilizar una estrategia basada en simulaciones en diferentes escenarios con diferente tipo de datos climáticos, lo cual lo provee de herramientas para trabajar con modelos no lineales. El modelo fue implementado en el software Modelica. En [45] los autores explican el modelo propuesto en [46], en este muestran las mejoras que tiene el SBMPC con respecto al MPC determinístico, además resaltan el desempeño de los modelos dispuestos en el software Modelica.

En [38] se evalúan dos estrategias de control para los sistemas de acondicionamiento térmico, L4GPCAO, Local for Global Parameterized Cognitive Adaptive Optimization y PCAO Local for Global Parameterized Cognitive Adaptive Optimization. En este trabajo los autores proponen una metodología de control centralizada (PCAO) y una descentralizada (L4GPCAO) y la comparan con la estrategia de control dispuesta en el edificio, la cual es una de las más confiables disponibles en el mercado, manifiestan los autores. La metodología se centra en

reducir el consumo de energía eléctrica proporcionado por la red eléctrica y garantizar un confort para los usuarios. Utilizan como motores de simulación MATLAB para implementar el controlador y modélica para la implementación del modelo térmico y eléctrico de la construcción. De los resultados, los autores resaltan la mejora en el consumo de energía y el confort brindado por parte de las estrategias L4GPCAO y PCAO contra el dispuesto en la construcción. La metodología PCAO presenta resultados ligeramente mejores que L4GPCAO sin embargo no cuenta con la versatilidad que proporciona L4GPCAO, el no necesitar información sobre toda la construcción proporciona importantes aportes para aquellos casos en los que el escenario cuente con muchos espacios analíticos.

3.2. Caracterización de variables ambientales

En esta sección se caracterizan las principales variables ambientales que se deben incluir en la formulación del modelo térmico de una construcción. Estas variables son necesarias para la parametrización del modelo, para definir las variables de entrada del mismo y para la gestión de los dispositivos activos de la construcción. Entre las variables climáticas más importantes en un contexto energético se encuentra la radiación solar. Tener conocimiento sobre la radiación que puede ser convertida a energía eléctrica o térmica es crucial para un correcto diseño activo y pasivo de una construcción sostenible. Además, es necesario conocer la geometría solar y otras variables ambientales que están implicadas en el modelado térmico tales como la velocidad del viento, la humedad y la temperatura de bulbo seco del ambiente.

3.2.1. Radiación solar

El sol se comporta como un perfecto emisor de radiación a una temperatura cercana a los 5800 K. Sin embargo, los rayos solares incidentes en la tierra se descomponen al interactuar con componentes de la atmósfera de la tierra, como las nubes, el vapor de agua, la misma capa atmosférica, aerosoles y oxígeno. El rayo solar se descompone básicamente en tres: radiación del haz o radiación directa, radiación difusa y el albedo, los cuales se definen a continuación:

Radiación del haz o directa

Es la radiación solar recibida del sol sin haber sido dispersada por la atmósfera.

Radiación difusa

La radiación solar recibida del sol después de que su dirección haya cambiado debido a la dispersión de la atmósfera.

Albedo

Fracción de la irradiancia solar que es reflejada por la superficie. Las superficies horizontales no reciben ninguna radiación reflejada, porque no ven ninguna superficie terrestre y las superficies verticales son las que más radiación reflejada reciben.

Irradiancia [W/m^2]

Es la tasa a la que la energía radiante incide sobre una superficie por unidad de área de superficie. El símbolo G se utiliza para la irradiancia solar, con subíndices apropiados para la radiación de haz, difusa o espectral.

Irradiación o exposición radiante [J/m^2]

Es la energía incidente por unidad de área en una superficie que se encuentra mediante la integración de la irradiancia durante un tiempo específico.

Masa de aire

Es la relación entre la masa de la atmósfera a través de la cual pasa la radiación del rayo y la masa a través de la cual pasaría si el sol estuviera en el cenit. Por tanto, al nivel del mar $m = 1$ cuando el sol está en el cenit y $m = 2$ para un ángulo cenital θ_z de 60° . Para ángulos cenitales de 0° a 70° al nivel del mar, puede usarse la siguiente aproximación [15]:

$$m = \frac{1}{\cos \theta_z}. \quad (3-1)$$

Radiación extraterrestre

Es la radiación solar que llega a la superficie de la tierra después de ser afectada por las interacciones con la capa atmosférica. Esta radiación está en función de la constante solar y la excentricidad de la tierra.

3.2.2. Geometría solar

Para conocer la cantidad de energía que se gana o se pierde debido a la radiación solar, es necesario entender la geometría involucrada en las diferentes formas de radiación, el movimiento de la tierra y la geoposición de la construcción.

Tiempo Solar

El tiempo solar es una medida del tiempo fundamentada en el movimiento aparente del sol sobre el horizonte del lugar. Toma como origen el mediodía. El tiempo solar es el tiempo

utilizado en todas las relaciones sol-ángulo; no coincide con la hora del reloj local [15], para poder explicarlo, es necesario introducir la ecuación del tiempo denotada por $E_t(t)$ y es aproximada por

$$E_t(t) = 9,87 \sin 2 B(t) - 7,53 \cos B(t) - 1,5 \sin B(t), \quad (3-2)$$

donde E_t esta dando en minutos con

$$B(t) = 360^\circ \frac{n(t) - 81}{364}, \quad (3-3)$$

donde n son los días del año contados a partir del 1 de Enero.

Ahora el tiempo solar se calcula mediante la siguiente expresión

$$t_{sol}(t) = t_{std}(t) + \frac{L_{std} - L_{loc}}{15^\circ/h} + \frac{E_t(t)}{60\text{min/h}}, \quad (3-4)$$

donde L_{std} es la hora estándar y L_{loc} es la hora local, las unidades de t estan dadas en horas.

Ángulo Zenith o Cenital (θ_z)

Es el ángulo entre la vertical y la línea al sol, es decir, el ángulo de incidencia de la radiación del haz sobre una superficie horizontal [15].

Ángulo de altitud solar (α_s)

Es el ángulo entre la horizontal y la línea al sol, es decir, el complemento del ángulo cenital [15].

Ángulo de declinación solar (δ)

Es la posición angular del sol al mediodía solar con respecto al plano del ecuador, norte positivo. Se calcula así [15]:

$$\sin \delta(t) = -\sin 23,45^\circ \cos \left(\frac{n(t) + 10}{365,25} 360^\circ \right), \quad (3-5)$$

donde n es la cantidad de días que han transcurrido en el año, contando desde el primero de enero.

Ángulo horario (ω)

El desplazamiento angular del sol al este u oeste del meridiano local debido a la rotación de la tierra sobre su eje a 15° por hora; mañana negativa, tarde positiva [15]. Se puede calcular de la siguiente forma [24]:

$$\omega(t) = \frac{(t_{sol}(t) - 12h)360^\circ}{24h}, \quad (3-6)$$

Ángulo azimutal de superficie (γ)

La desviación de la proyección en un plano horizontal de la normal a la superficie del meridiano local, con cero hacia el sur, este negativo y oeste positivo [15].

Ángulo de incidencia (θ)

Es el ángulo entre el rayo de radiación en una superficie y la normal a la superficie [15]. Para calcular este ángulo se pueden usar las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} \cos\theta(t) = & \sin\delta(t)\sin\phi(t)\cos\beta(t) - \sin\delta(t)\cos\phi(t)\sin\beta(t)\cos\gamma(t) + \cos\delta(t)\cos\phi(t)\cos\beta(t)\cos\omega(t) \\ & + \cos\delta(t)\sin\phi(t)\sin\beta(t)\cos\gamma(t)\cos\omega(t) + \cos\delta(t)\sin\beta(t)\sin\gamma(t)\sin\omega(t), \end{aligned} \quad (3-7)$$

y

$$\cos\theta(t) = \cos\theta_z(t)\cos\beta(t) + \sin\theta_z(t)\sin\beta(t)\cos(\gamma_s - \gamma)(t). \quad (3-8)$$

Para superficies verticales ($\beta = 90^\circ$) la ecuación se convierte en:

$$\cos\theta(t) = -\sin\delta(t)\cos\phi(t)\cos\gamma(t) + \cos\delta(t)\sin\phi(t)\cos\gamma(t)\cos\omega(t) + \cos\delta(t)\sin\gamma(t)\sin\omega(t). \quad (3-9)$$

Para superficies horizontales ($\beta = 0^\circ$), el ángulo de incidencia es equivalente al ángulo zenith, y se calcula de la siguiente manera:

$$\cos\theta_z(t) = \cos\phi(t)\cos\delta(t)\cos\omega(t) + \sin\phi(t)\sin\delta(t), \quad (3-10)$$

En [37] se desarrolla una expresión para el ángulo de incidencia en una superficie inclinada como sigue:

$$\begin{aligned} \cos\theta_i(t) = & \cos\beta(\cos\delta(t)\cos\omega(t)\cos\phi + \sin\delta(t)\sin\phi) + \sin\beta\sin\gamma(t)\cos\delta(t)\sin\omega(t) \\ & + \sin\beta\cos\gamma(\cos\delta(t)\cos\omega(t)\sin\phi - \sin\delta(t)\cos\phi) \end{aligned} \quad (3-11)$$

Ángulo azimutal solar (γ_s)

Es el desplazamiento angular desde el sur de la proyección de la radiación del haz en el plano horizontal de la superficie. Los desplazamientos al este del sur son negativos y al oeste del sur son positivos [15]. Se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$\gamma_s(t) = \text{sign}(\omega(t)) \left| \cos^{-1} \left(\frac{\cos\theta_z(t)\sin\phi(t) - \sin\delta(t)}{\sin\theta_z(t)} \cos\phi(t) \right) \right|, \quad (3-12)$$

Pendiente (β)

Es el ángulo entre el plano de la superficie en cuestión y la horizontal [15].

Latitud (ϕ)

Proporciona la localización de un lugar, en dirección Norte o Sur desde el ecuador y se expresa en medidas angulares que varían desde los 0° del Ecuador hasta los 90°N ($+90^\circ$) del polo Norte o los 90°S (-90°) del polo Sur.

Longitud

Proporciona la localización de un lugar, en dirección Este u Oeste desde el meridiano de referencia 0° , o meridiano de Greenwich, expresándose en medidas angulares comprendidas desde los 0° hasta 180°E ($+180^\circ$) y 180°W (-180°).

Los ángulos mencionados anteriormente se ven plasmados en la Figura 3-1.

3.2.3. Procesamiento de variables de entrada del modelo

La mayor parte de la información sobre radiación solar disponible ha sido obtenida mediante dos dispositivos llamados piranómetro y piroheliómetro. Un piroheliómetro es un instrumento que se utiliza para medir la radiación solar del sol y de una pequeña porción del cielo alrededor del sol con una incidencia normal. Un piranómetro es un instrumento para medir la radiación solar hemisférica total (directa y difusa), generalmente en una superficie horizontal. Debido a que estos dos dispositivos son los usados generalmente, es normal entonces obtener datos sobre radiación horizontal directa normal y difusa. Con base en esto, esta metodología supone que se cuenta con la radiación horizontal global $H_{glo,hor}(t)$ y la radiación horizontal difusa $H_{dif,hor}(t)$. El objetivo es encontrar la irradiancia solar directa sobre una superficie inclinada $H_{dir,inc}(t)$ y la irradiancia solar difusa sobre una superficie inclinada $H_{dif,inc}(t)$, utilizando el método presentado en [37].

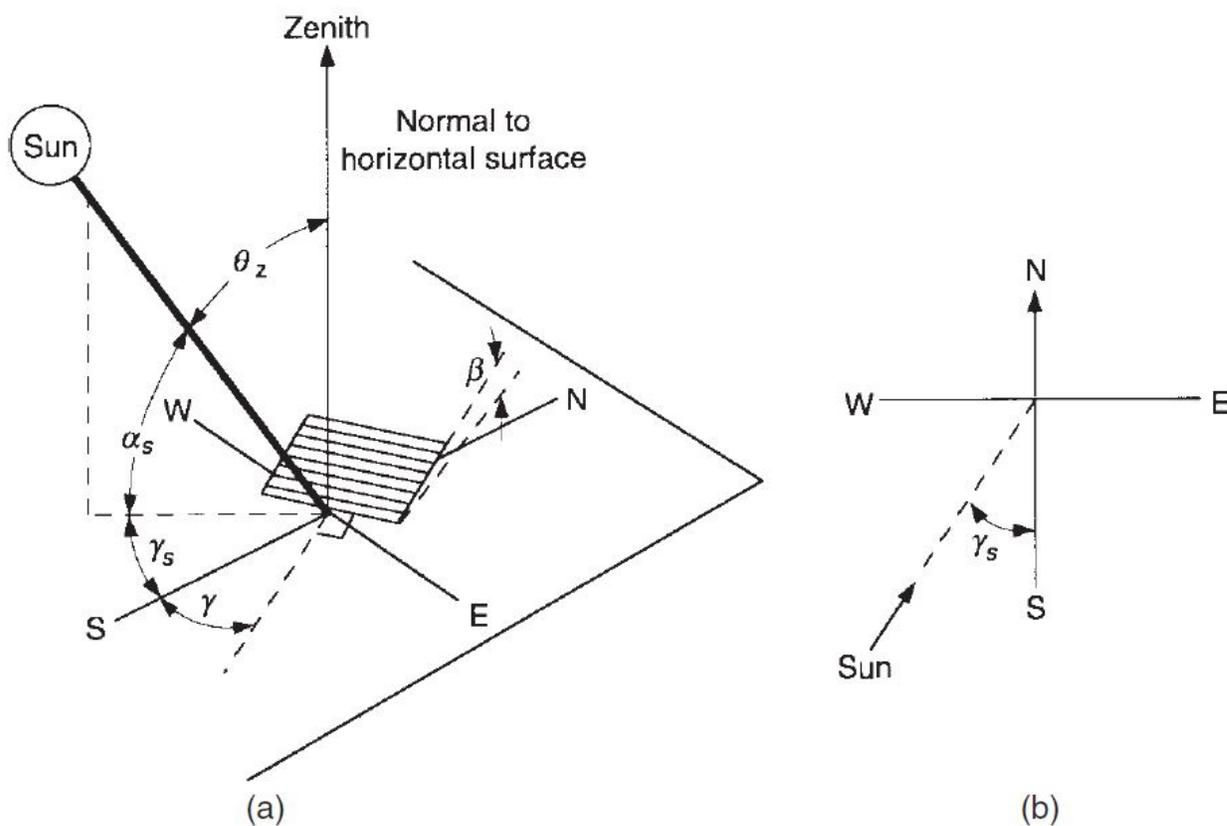


Figura 3-1.: (a) Ángulo cenital, pendiente, ángulo azimutal de superficie y ángulo azimutal solar para una superficie inclinada. (b) Vista en planta que muestra el ángulo azimutal solar. Tomado de [15]

Irradiancia solar directa sobre una superficie inclinada

Para calcular la cantidad de energía por radiación proveniente directamente del rayo solar se utiliza la siguiente expresión:

$$H_{dir,hor}(t) = H_{glo,hor}(t) - H_{dif,hor}(t), \quad (3-13)$$

Ahora para encontrar la irradiancia solar en una superficie inclinada se usa la ley de cosenos de Lambert para proyectar la irradiancia a una superficie. Finalmente resulta una expresión para la irradiancia solar directa por unidad de área real sobre una superficie es:

$$H_{dir,inc} = I_{dir}(t) \cos(\theta_i(t)) \quad (3-14)$$

donde,

$$I_{dir}(t) = \frac{H_{dir,hor}(t)}{\cos \gamma_s(t)} \quad (3-15)$$

Una vez conseguida una expresión para cuantificar la cantidad de radiación directa incidente en una superficie inclinada, solo falta calcular la radiación difusa incidente en una superficie inclinada.

Irradiancia solar difusa sobre una superficie inclinada

Existen diferentes métodos para calcular esta magnitud, entre ellos se encuentran el modelo isotrópico propuesto en [27] y un modelo mas complejo desarrollado por Perez en [44]. En esta tesis se presentará únicamente el modelo isotrópico. Este modelo propone calcular la radiación solar difusa sobre una superficie inclinada mediante la siguiente expresión:

$$H_{dif,inc}(t) = H_{dif,hor}(t) \frac{1 + \cos\beta}{2}, \quad (3-16)$$

en esta ecuación no se está teniendo en cuenta la radiación reflejada del suelo.

Anteriormente se presentaron expresiones para calcular la cantidad de energía por unidad de área que incide sobre las superficies de nuestra construcción. Ahora, la tarea es entender como la construcción absorbe esta energía. Pero antes de eso, es necesario entender que la radiación tiene diferentes componentes que dependen de la longitud de onda en el que se encuentren. Radiación de onda corta, de onda larga, infrarroja, ultra violeta, rayos x y rayos gamma. Son los tipos de radiación que emite el sol y la mayor cantidad de energía la porta la radiación de onda corta, seguida de la radiación de onda larga. Una vez realizada esta aclaración, es importante aclarar que existen varios métodos para calcular la cantidad de energía absorbida por la construcción y estas se encuentran definidas en el manual VDI 6007 Parte 1. Unas consideran únicamente las ganancias de energía provenientes de la radiación de onda corta y otras consideran la radiación de onda corta y larga. A continuación se presentará la expresión que describe el primer fenómeno.

$$T_{sw} = \frac{H_{sol}a}{h_r + h_c}(1 - s), \quad (3-17)$$

$$H_{sol} = H_{dif,inc} + H_{dir,inc} \quad (3-18)$$

donde T_{sw} es la temperatura equivalente de la superficie sobre la cual incide la radiación, a es el coeficiente de absorción de la superficie exterior de la superficie, s es una constante real que describe la geometría del toldo de la superficie; 0 para superficies sin toldo y 1 para superficies con toldo que impiden el paso total de la luz, h_c corresponde al coeficiente de transferencia de calor por convección y h_r corresponde al coeficiente de transferencia de calor linealizado por radiación. De esta forma entonces se consigue la temperatura de los nodos que conecta la construcción con el ambiente exterior.

En esta sección se explicaron los conceptos necesarios y se desarrollaron los métodos necesarios para construir las entradas del modelo térmico que se explicará en la próxima sección. Como se discutió en la sección 3.1, para poder realizar un análisis energético en una construcción es necesario hacer uso de una herramienta que permita conocer las interacciones entre las variables climatológicas, los dispositivos HVAC, la envolvente de la construcción y sus habitantes. Ahora que se dispone de conceptos sobre termodinámica y el procesamiento de información meteorológica, en la siguiente sección se desarrollará el modelo energético.

3.3. Modelo matemático de la construcción

En esta sección se desarrollará el modelo térmico de la construcción, inicialmente se expondrán conceptos claves para entender la metodología de modelado, luego se hará una descripción de la metodología de modelado de resistencia y capacitancia térmica, posteriormente se realizará una descripción del procesamiento de los datos climatológicos, se presentará un software desarrollado para la automatización del modelado térmico de construcciones a partir de archivos de modelos arquitectónicos en 3D y por último se presenta una validación de la metodología de modelado.

3.3.1. Conceptos importantes

Antes de realizar la descripción de la metodología de modelado, es necesario exponer conceptos de termodinámica relacionados con la transferencia de calor para poder contar con las herramientas necesarias para explicar la metodología.

Capacitancia Térmica (C)

La capacitancia térmica está relacionada con la capacidad de almacenamiento de energía y no asume pérdidas de energía. Se define como el flujo de calor necesario para cambiar la tasa de temperatura de un medio en una unidad en un segundo y se escribe como se muestra a continuación:

$$C = C_p \rho V, \quad (3-19)$$

donde C_p corresponde a la capacidad calorífica a presión constante, ρ es la densidad del material y V el volumen.

Conductividad térmica (k)

Es una propiedad física de los materiales que mide la capacidad de conducción de calor. En otras palabras, la conductividad térmica es también la capacidad de una sustancia para

transferir la energía cinética de sus moléculas a otras adyacentes o a sustancias con las que está en contacto y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$k = \frac{\dot{q}}{|\Delta T|}, \quad (3-20)$$

donde \dot{q} es el flujo de calor y ΔT es el gradiente de temperatura.

Resistencia térmica (R_{th})

Representa la capacidad del material de oponerse al flujo de temperatura. En el caso de materiales homogéneos, es la razón entre el espesor y la conductividad térmica del material, en tanto para materiales no homogéneos la resistencia es el inverso de la conductancia térmica. La resistencia térmica depende del medio en el cual se transporta el flujo de calor. Estos medios son, convección, conducción y radiación. Conceptos que posteriormente se presentarán.

Transmitancia térmica (U)

Es la medida del calor que fluye por unidad de tiempo y superficie, transferido a través de un sistema constructivo, formado por una o más capas de material, de caras plano paralelas, cuando hay un gradiente térmico de 1°C (o 1K) de temperatura entre los dos ambientes que éste separa. La transmitancia térmica está dada por:

$$U = \frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_{conv} + R_{rad} + R_{cond}}, \quad (3-21)$$

donde R_t es la resistencia total o equivalente, R_{conv} es la resistencia a la transferencia de calor por convección, R_{rad} es la resistencia a la transferencia de calor por radiación y R_{cond} es la resistencia a la transferencia de calor por conducción. Existen expresiones para calcular estas resistencias, a continuación, se contextualizarán estos conceptos.

Transferencia de calor por conducción

Es la transferencia de calor que se produce a través de un medio material por contacto directo entre sus partículas, cuando existe una diferencia de temperatura y en virtud del movimiento de sus micropartículas. La transferencia ocurre en todos los estados de la materia y el medio puede ser sólido, líquido o gaseoso, aunque en líquidos y gases solo se da la conducción pura si se excluye la posibilidad de convección. La cantidad de calor que se transfiere por conducción viene dada por la ley de Fourier:

$$Q = \frac{kA}{L}(T_1 - T_2), \quad (3-22)$$

donde T_1 y T_2 corresponden a las temperaturas antes y después del medio material respectivamente, A hace referencia al área de la superficie, k es el coeficiente de conductividad térmica, característica propia del material y L corresponde al espesor del material.

Transferencia de calor por convección

Se compone de dos mecanismos simultáneos. El primero, es la transferencia de calor por conducción, debido al movimiento molecular, a la que se superpone la transferencia de energía por el movimiento de fracciones del fluido que se mueven accionadas por una fuerza externa, que puede ser un gradiente de densidad (convección natural), o una diferencia de presión producida mecánicamente (convección forzada) o una combinación de ambas. La cantidad de calor transferido por convección, se rige por la ley de enfriamiento de Newton dada por:

$$Q = h_c A (T_1 - T_2)^b, \quad (3-23)$$

donde T_1 y T_2 corresponden a las temperaturas del fluido (líquido o gaseoso) y la temperatura de la superficie del objeto, A hace referencia al área de la superficie, b es un exponente de escala y h es el coeficiente de convección de calor. El cálculo de h tiene diversas aproximaciones en la literatura, en [31] se hace una revisión del cálculo de este coeficiente. Este coeficiente se divide en dos tipos, coeficiente por convección forzada y coeficiente por convección natural. En esta tesis se utilizará el coeficiente por convección natural debido a que es la forma de transferencia de calor por convección más común en este contexto. En el manual de fundamentos de ASHRAE se exponen algunos coeficientes obtenidos mediante correlaciones. Estos se describirán a continuación:

Para superficies horizontales:

$$h_c = \begin{cases} 0,948 \text{ W}/(m^2K), & \text{para convección reducida,} \\ 4,040 \text{ W}/(m^2K), & \text{para convección mejorada.} \end{cases}$$

Para superficies inclinadas:

$$h_c = \begin{cases} 2,281 \text{ W}/(m^2K), & \text{para convección reducida,} \\ 3,076 \text{ W}/(m^2K), & \text{para superficies verticales,} \\ 3,870 \text{ W}/(m^2K), & \text{para convección mejorada.} \end{cases}$$

Transferencia de calor por radiación

Todos los cuerpos, cualquiera sea su temperatura, emiten energía en forma continua desde sus superficies. Esta energía se denomina energía radiante y es transportada por ondas electromagnéticas. Por este motivo, la energía radiante puede transmitirse aún en el vacío. La

emisión continua de energía radiante por un cuerpo se denomina radiación. Stefan Boltzmann propuso una expresión para calcular la energía ganada o perdida por segundo:

$$Q = \epsilon\sigma A(T^4 - T_a^4), \quad (3-24)$$

donde T corresponde a la temperatura del cuerpo, T_a a la temperatura ambiente, σ es la constante de Stefan-Boltzmann, ϵ es la emisividad, característica propia de cada material y A representa el área del cuerpo expuesta al medio ambiente.

Cuando la diferencia entre las temperaturas T y T_a no es demasiada, podemos linealizar la relación no lineal de la siguiente forma:

$$Q = h_r(T - T_a), \quad (3-25)$$

donde, h_r es el coeficiente de transferencia de calor por radiación y se define mediante la siguiente expresión:

$$h_r = 4\sigma AT_{med}^3, \quad (3-26)$$

donde T_{med} es la temperatura media de alguna de las dos temperaturas.

Con esta definición se concretan los conceptos necesarios para comprender la metodología de modelado que se presentará en la próxima sección.

3.3.2. Metodología de modelado

Esta metodología de modelado consiste en realizar una analogía entre el análisis de circuitos eléctricos y los fenómenos de transferencia de calor. De esta forma, la corriente eléctrica corresponde al flujo de calor, la diferencia de potencial corresponde a la diferencia de temperatura, la resistencia eléctrica corresponde a resistencias térmicas y los capacitores eléctricos corresponden a capacitores térmicos. La metodología es bastante usada en la literatura debido a que las interacciones que existen entre los componentes de un circuito eléctrico se comportan de la misma manera que en un circuito térmico. Las resistencias representan una oposición a la transferencia de calor y las capacitancias representan almacenamiento de calor. Para modelar el comportamiento térmico y energético de una construcción mediante esta metodología se debe construir una red de resistencias y capacitancias (red RC) en la que se pueda identificar cada uno de los componentes de la construcción que interactúen térmicamente, por ejemplo: paredes, techo, piso, ventanas, bombillos, dispositivos HVAC, etc.

Para entender la metodología se analizará una red que representa una pared externa de una construcción, compuesta por tres resistencias y 2 capacitores (3R2C) presentada en la Figura 3-2.

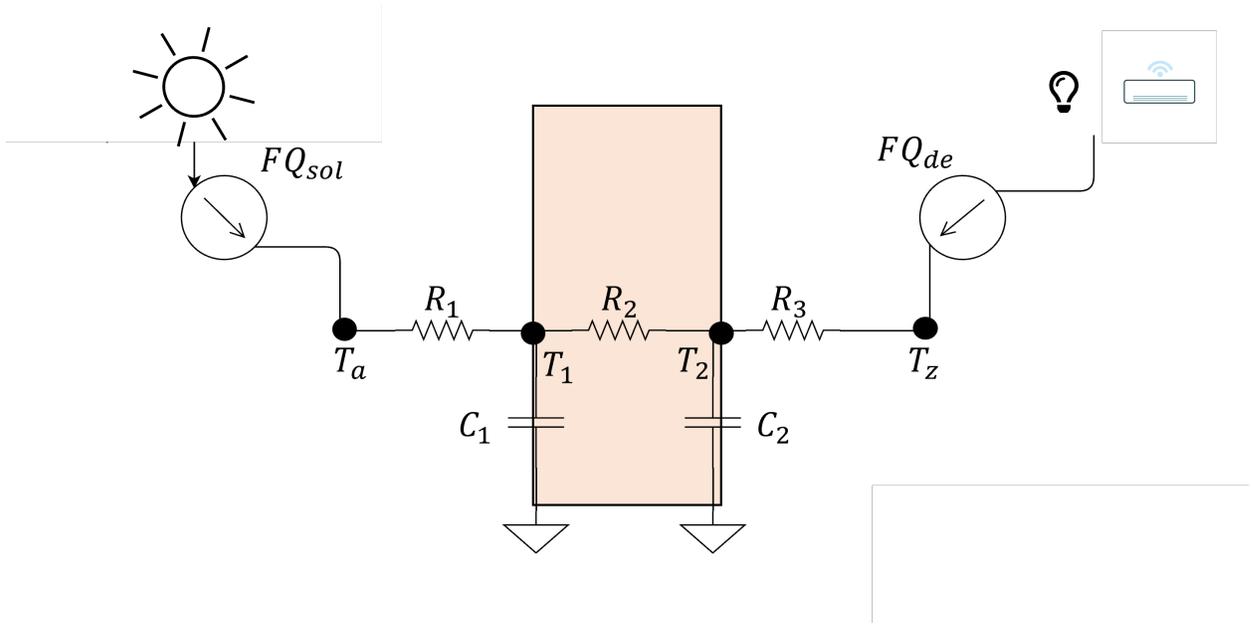


Figura 3-2.: Diagrama de un circuito 3R2C que representa una pared externa de una construcción

Cada una de las resistencias de la Figura 3-2 representa una forma de transferencia de calor. La resistencia R_1 representa la transferencia de calor por convección que ocurren entre el aire y la superficie externa de la pared, T_a y T_1 respectivamente. La resistencia R_2 representa la transferencia de calor por conducción que hay entre la cara externa de la pared y la cara interna, T_1 y T_2 respectivamente. La resistencia R_3 representa la transferencia de calor por convección que existe entre la cara interna de la pared y la zona interna de la construcción, T_2 y T_z respectivamente. Las fuentes de calor FQ_{sol} y FQ_{de} representan el calor que recibe la pared debido a la radiación solar y a los dispositivos electrónicos dentro de la zona respectivamente, F es un factor que determina la cantidad de calor que se adquiere de la fuente Q . A continuación, se introducen los conceptos vistos en la sección 3.1 para escribir las ecuaciones que describen el comportamiento térmico de esta red.

$$\frac{C_1 dT_1}{dt} = \frac{T_a - T_1}{R_1} + \frac{T_2 - T_1}{R_2} + FQ_{solar}, \quad (3-27)$$

$$\frac{C_2 dT_2}{dt} = \frac{T_1 - T_2}{R_2} + \frac{T_2 - T_z}{R_3} + FQ_{de}, \quad (3-28)$$

donde

$$R_1, R_3 = \frac{kA}{L}, R_2 = \frac{1}{hA}. \quad (3-29)$$

Como se comentó en la Sección 2.1, la metodología de modelamiento es de base fenomenológica, es posible reconocer la construcción interpretando la topología de la red. Ya que se presentó de una forma simple el funcionamiento de la metodología, es posible generalizar esta mediante la siguiente ecuación:

$$C_k \frac{dT_k}{dt} = \sum_k \frac{T_k - T_k}{R_{k,k}} + \sum_j F_j Q_j. \quad (3-30)$$

La metodología de modelamiento de resistencia y capacitancia térmica es muy popular para el análisis energético en las construcciones, como por ejemplo el software EnergyPlus que utiliza esta herramienta para sus cálculos. Por este motivo, investigadores de la universidad de RWTH Aachen y Berkeley desarrollaron librerías para el análisis energético de construcciones basados en la metodología de modelamiento RC en el marco del proyecto IEA EBC Annex 60. Estas librerías llamadas Aixlib y Buildings fueron desarrolladas en el software Modelica y contienen una sección de modelos de zonas térmicas que contienen diferentes topologías de redes en las que se pueden considerar paredes externas, internas, techo o el piso. En [33] se presenta la herramienta Aixlib y además se presenta una validación del modelo con un caso de estudio diseñado por la asociación ASHRAE en el marco del estándar 140. Uno de los casos de estudio presentes en este estándar y con los cuales fue probado la librería, es el caso 600 (ver Figura 3.3.2).

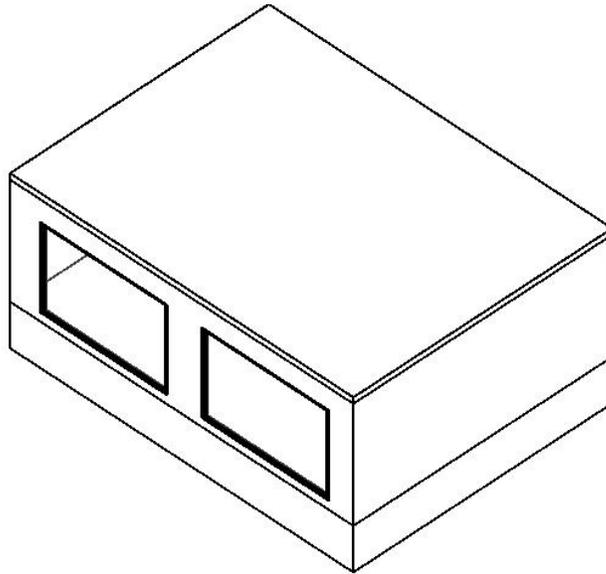


Figura 3-3.: Definición base de zona de pruebas dada en ASHRAE Standard 140 (2011)

Este caso de estudio consiste en una construcción ligera rectangular de $8m$ de ancho, $6m$ de largo y $2.7m$ de altura. Orientadas hacia el sur tiene dos ventanas que suman $12 m^2$ de área. La información detallada sobre las paredes exteriores de la construcción se encuentra

resumida en la tabla 3.3.2, sobre la cubierta en la tabla 3.3.2, sobre el piso 3.3.2. Note que las unidades en las que se presentan estas variables son diferentes a las unidades con las que se parametriza el modelo de la librería Aixlib **3-4**. Para conocer los detalles sobre las ventanas consultar la Sección 5.2.1 de la norma ANSI/ASHRAE 140-2001.

Elemento	k (W/mK)	Espesor (m)	R (m^2K/W)	Densidad (kg/m^3)	Cp (J/kgK)
C. convección interior h	-	-	0.121	-	-
Cartón de yeso	0.16	0.012	0.075	950	840
Fibra de vidrio	0.04	0.066	1.65	12	840
Revestimiento de madera	0.14	0.009	0.064	530	900
C. convección exterior h	-	-	0.034	-	-

Tabla 3-1.: Información sobre la composición constructiva de las paredes exteriores

Elemento	k (W/mK)	Espesor (m)	R (m^2K/W)	Densidad (kg/m^3)	Cp (J/kgK)
C. convección interior h	-	-	0.121	-	-
Cartón de yeso	0.16	0.01	0.063	950	840
Fibra de vidrio	0.04	0.1118	2.794	12	840
Cubierta de la azotea	0.14	0.019	0.136	530	900
C. convección exterior h	-	-	0.034	-	-

Tabla 3-2.: Información sobre la composición constructiva de la cubierta

Elemento	k (W/mK)	Espesor (m)	R (m^2K/W)	Densidad (kg/m^3)	Cp (J/kgK)
C. convección interior h	-	-	0.121	-	-
Suelo de madera	0.14	0.025	0.179	650	1200
Aislamiento	0.04	1.003	25.075	-	-

Tabla 3-3.: Información sobre la composición constructiva de el piso

A continuación, se presentan algunos detalles sobre estas librerías.

3.3.3. Librerías Aixlib y Buildings

Como se mencionó anteriormente, estas librerías fueron desarrolladas en el marco del proyecto IEA EBC Annex 60, con la intención de proveer un conjunto de herramientas para realizar el análisis energético de construcciones. Dentro del conjunto de estas herramientas, existe

Categoría	Parámetro	Unidad	Descripción
Zona térmica	VAir	m ³	Volúmen de aire de la zona
	hRad	W/m ² K	Coefficiente de transferencia de calor para la radiación linealizada entre paredes
	nOrientations	-	Número de orientaciones
Ventanas	AWin	m ²	Vector de las áreas de las ventanas por orientación
	ATransparent	m ²	Vector de las áreas transparentes de las ventanas por orientación
	hConWin	W/m ² K	Coefficiente de transferencia de calor por convección de las ventanas
	Rwin	K/W	Resistencia térmica de las ventanas
	gWin	-	Transmitancia de energía total de las ventanas
	ratioWinConRad	-	Relación de las ventanas entre la emisión de calor por convección y por radiación en interiores
Paredes exteriores	AExt	m ²	Vector de las áreas de las paredes exteriores por orientación
	hConExt	W/m ² K	Coefficiente de transferencia de calor por convección de las paredes exteriores
	nExt	-	Número de elementos RC de las paredes exteriores
	RExt	K/W	Vector de resistencias de paredes exteriores, desde el interior hasta el exterior
	RExtRem	K/W	Valor de resistencia de la resistencia restante RExtRem entre capacidad n y exterior
	CExt	J/K	Vector de las capacidades caloríficas de las paredes exteriores, desde el interior hasta el exterior

Tabla 3-4.: Tabla de elementos necesarios para la parametrización del modelo de Aixlib

una sección de modelos térmicos que contiene modelos de orden reducido basados en la metodología de resistencia y capacitancia térmica. Estos modelos fusionan todas las masas térmicas en un elemento, parametrizado por la cadena RC que depende de la cantidad de orientaciones de la construcción, un vector de capacitancias que está conectado a través de un par de vectores de resistencias hacia el exterior y el medio ambiente [33]. En la Tabla 3-4 se muestran los parámetros necesarios del modelo desarrollado en las librerías. El modelo presentado contempla sólo las interacciones entre la zona, sus paredes externas y ventanas, sin embargo, también contempla interacciones con el techo, paredes internas y el piso. Para parametrizar estos modelos solo se deben establecer las características del elemento que se desee anexar, tal y como se hizo con las paredes exteriores.

Además de contar con estos elementos, las librerías cuentan con útiles herramientas para procesar la información meteorológica y facilitar los cálculos ya mencionados en la sección 3.2.2. Entre estas herramientas existe una que permite calcular la radiación incidente en una superficie inclinada por medio del cálculo del ángulo de inclinación, así como se vio

en la ecuación 3-7. Una herramienta para calcular la radiación difusa en una superficie inclinada mediante un método propuesto por Pérez [27, 39]. Otra herramienta para calcular los índices de confort PMV y PPD anteriormente explicados. Y demás herramientas que se pueden consultar en el repositorio de las librerías.

3.3.4. Validación de la metodología

Para validar la metodología se diseñó un modelo que se ajusta a las especificaciones planteadas en el estándar ASHRAE 140-2001 en la sección 5.2.1 y además cumple con el planteamiento anteriormente presentado, ver Figura 3-4.

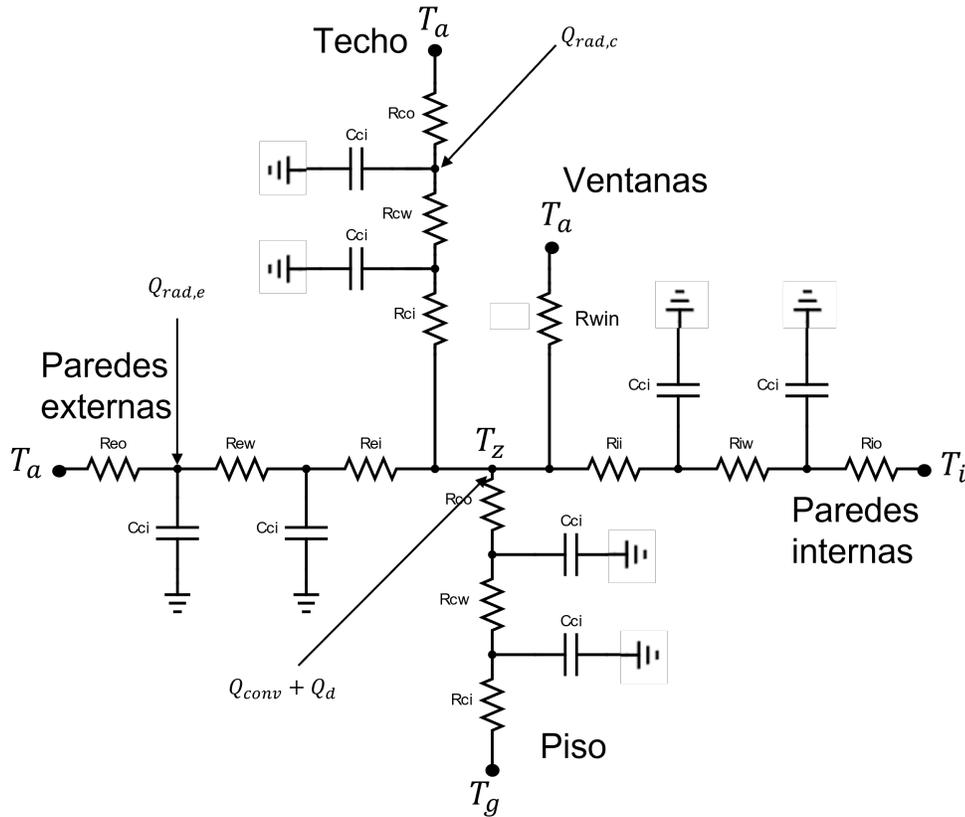


Figura 3-4.: Red diseñada para probar la metodología

En la red se pueden identificar resistencias y capacitancias con un par de subíndices. El primer subíndice hace referencia a el techo (c), paredes externas (e), paredes internas (i), piso(g). El segundo subíndice hace referencia al coeficiente de convección entre la pared y el aire exterior (o), al coeficiente de conducción de la pared (w) y finalmente, el coeficiente de convección entre la pared y el aire interior (i). Además, se puede observar que existen ganancias de calor debidas a la radiación denotadas por el subíndice (rad) y ganancias o pérdidas de calor

debidas a los dispositivos electrónicos de aclimatación (Q_d) y a la actividad de los habitantes de la construcción (Q_{conv}).

Para validar la metodología se prueba la red presentada en la Figura 3-4 con los datos de salida proporcionados por el modelo ya validado por aixlib en [33]. Los datos de radiación son los mismos a los utilizados en la librería y la parametrización de la red se hace de acuerdo con lo especificado por la norma ASHRAE Standard 140 Case 600. Los resultados son presentados en la Figura 3-5.

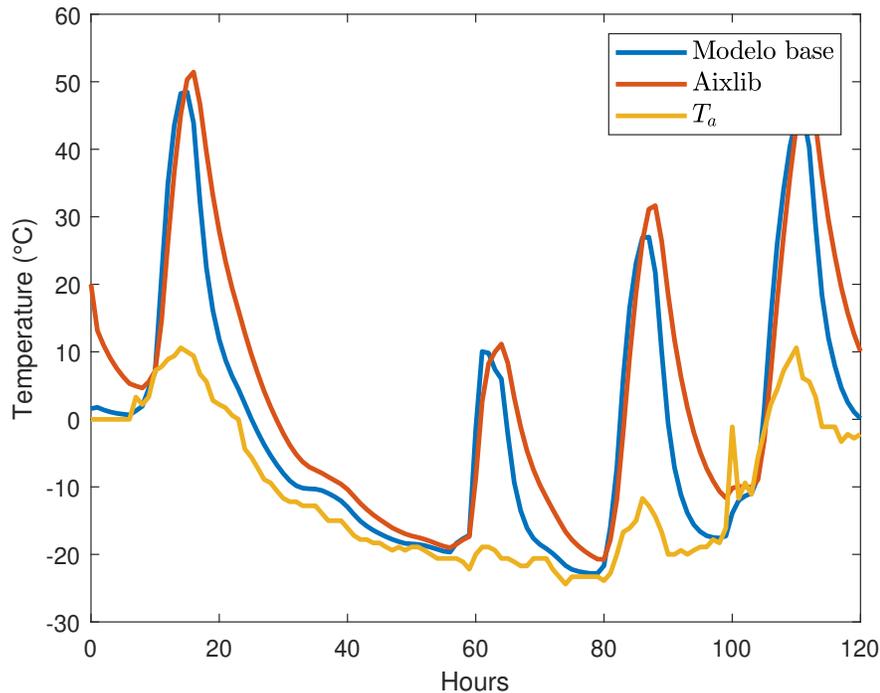


Figura 3-5.: Red diseñada para probar la metodología

Las dinámicas térmicas del modelo base presentado anteriormente presenta resultados con un error relativo menor a 7.11 % con respecto al modelo presentado en la librería Aixlib, una media de 1.87 % y una desviación estándar de 1.42 %. En vista de estos resultados, es posible concluir que la metodología presenta un ajuste que permite continuar con el desarrollo de la tesis. En la siguiente sección se presentará un software desarrollado para automatizar la generación de modelos térmicos RC mediante la transformación de un archivo gbXML.

3.4. Software de simulación para modelos térmicos de construcciones

Dentro de los objetivos misionales de la ingeniería se encuentra proponer soluciones para los problemas que acarrea la humanidad en su actualidad, sin embargo, encontrar las soluciones no siempre es suficiente. Facilitar las soluciones a la población objetivo también es fundamental para que el impacto de la solución se vea reflejado. Por esto, en esta sección se presenta un software desarrollado en esta tesis que tiene como objetivo brindar soporte a los profesionales desde la etapa de diseño arquitectónico, sugiriendo cambios en los materiales de construcción, en la orientación y en otros componentes de la construcción que se discutirán próximamente. El software tiene como nombre “Nest Designer”, fue desarrollado en el lenguaje Python y utiliza OpenModelica como el motor de simulación del modelo energético de la construcción. Para su funcionamiento requiere esencialmente 2 archivos de entrada, un archivo de extensión.mat que contenga los datos meteorológicos y un archivo tipo gbXML exportado del modelo 3D del diseño de la construcción. En la Figura 3-6 se presenta un mapa esquemático en el que se explica el funcionamiento de la herramienta. Como se mencionó anteriormente, el software requiere de un archivo de tipo gbXML que se explica en la sección 3.4.1 y un archivo de extensión .mat que contenga los datos meteorológicos en una ventana de tiempo de un año para un funcionamiento óptimo de la herramienta. Dentro de estos datos meteorológicos, es esencial contar con datos de radiación global horizontal, datos de temperatura de bulbo seco, temperatura radiante de ser posible, datos de velocidad y dirección del viento y de humedad relativa. Por medio de estos se construye un archivo de extensión .mo que será ejecutado en OpenModelica desde Python mediante la API OMPython [21]. En este punto el software tiene la capacidad de ofrecer un análisis energético de la construcción preliminar. En este punto el software resuelve un problema de optimización que se presenta en la sección 4, en donde se busca optimizar el diseño pasivo de la construcción mediante la selección de los materiales óptimos, que se ajusten a las condiciones ambientales de la zona en donde se ubica la construcción, además de proponer modificaciones arquitectónicas como modificaciones en el tamaño de las ventanas o la inclusión de toldos. Finalmente se genera un reporte en el que se hacen las sugerencias ya mencionadas y se presentan indicadores energéticos de la construcción.

3.4.1. Archivos gbXML

El proceso de construcción de una residencia involucra diferentes etapas dependiendo de la dificultad y de las exigencias del usuario y del profesional a cargo. Sin embargo, la etapa de diseño es obligatoria sin importar de las preferencias del constructor. Esta etapa de diseño involucra generalmente un software de diseño 3D en el cual se consigna toda la información de la construcción, hecho que generó diferentes iniciativas para consignar un formato en el que se pueda extraer toda la información de la construcción. Existen diferentes formatos

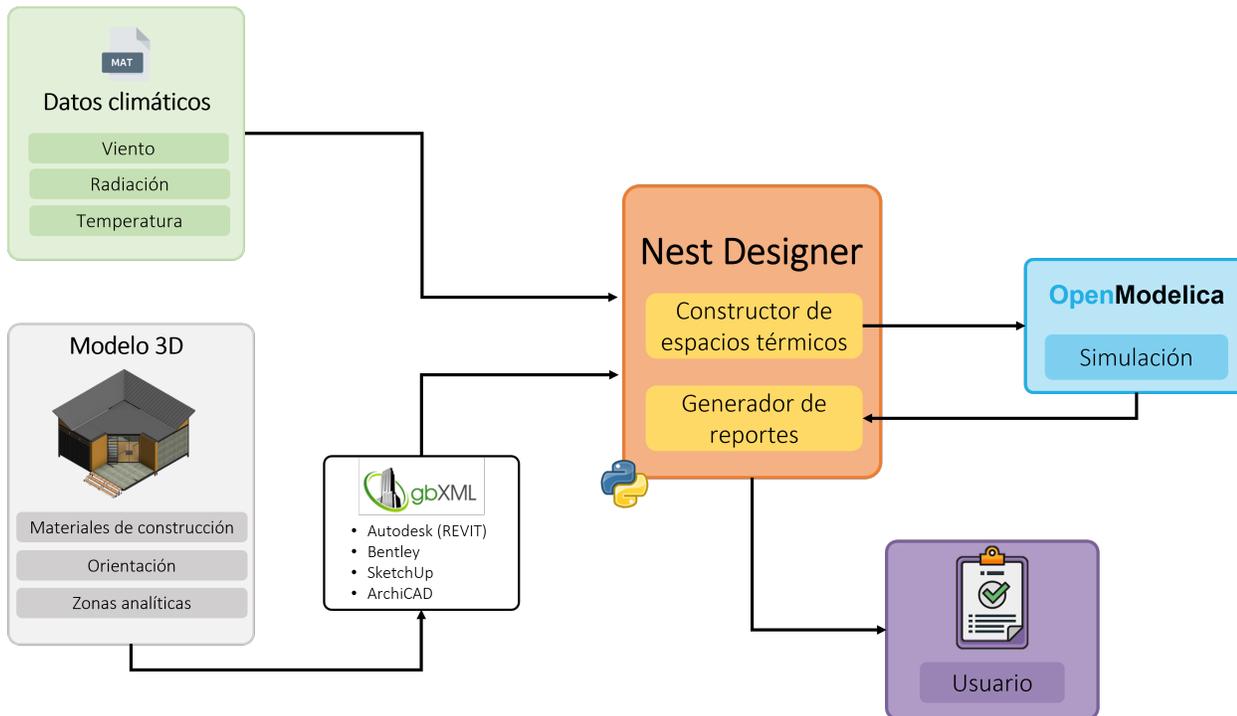


Figura 3-6.: Mapa descriptivo del funcionamiento del software Nest Designer

propuestos por diferentes herramientas, en [35] hacen una revisión de 24 formatos disponibles para exportar información de la construcción. Como se mencionó anteriormente, en esta tesis se escogió la herramienta gbXML, la cual adopta un enfoque “top-down”, el cual es completo y genérico para representar una estructura de edificio completa. Debido a que el análisis energético que se desea realizar es macroscópico, se considera una herramienta adecuada.

El archivo gbXML (Green Building XML) es un esquema derivado del lenguaje XML (eXtensible Markup Language), que fue desarrollado por una compañía en llamada Green Building Studio en junio del año 2000. Este es un esquema popularmente utilizado a nivel industrial y es soportado por diversos softwares líderes de diseño y en la metodología BIM (Building Information Modelling) como Autodesk, Trimble, Graphisoft y Bentley. En el sitio web de la herramienta se puede encontrar más información acerca de la historia y características del esquema (<https://www.gbxml.org>).

El esquema describe la construcción mediante más de 50 atributos, en la figura 3-7 se puede apreciar alguno de los atributos que contiene el esquema.

Estos atributos son necesarios para parametrizar el modelo presentado anteriormente en la tabla 3-4. En la Figura 3-7 se pueden apreciar recuadros coloreados que representan una relación entre los mismos. En color naranja se encuentran coloreados los elementos que determinan el horario en el que están prendidas las luces, equipos de aclimatación térmica e incluso la ocupación de los habitantes de la construcción. Para identificar la envolvente térmica de la construcción se encuentran coloreados los elementos de color verde. El archivo

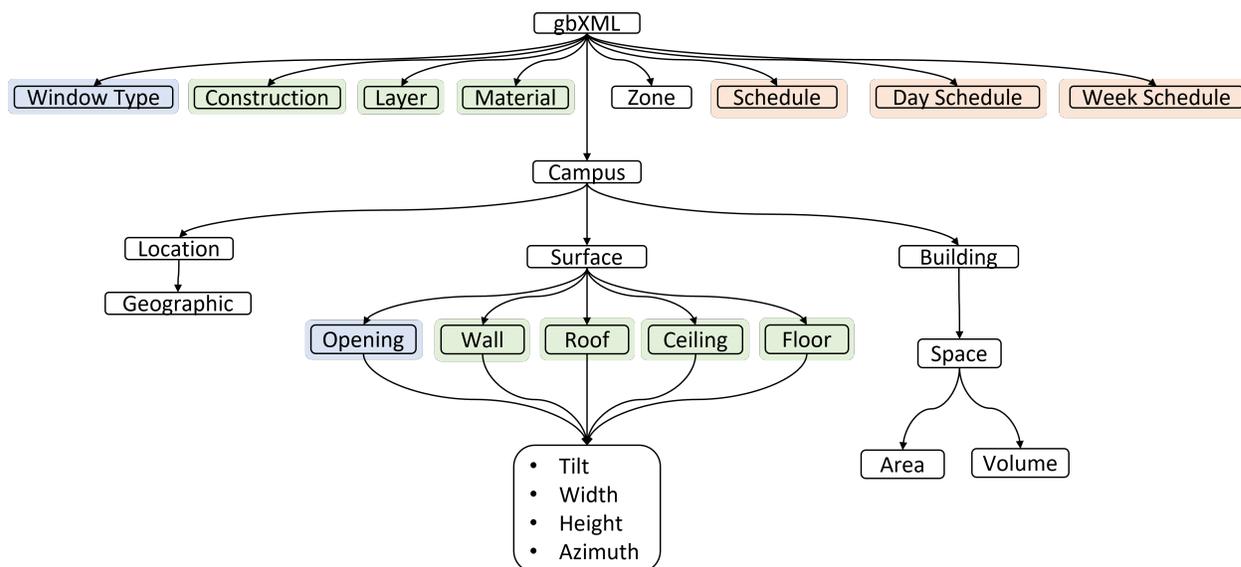


Figura 3-7.: Mapa generalizado de los atributos del esquema gbXML necesarios para la construcción del modelo

tiene un elemento llamado Campus que contiene a otro elemento llamado Surface, y este elemento tiene un atributo llamado surfaceType, es en este atributo en el que se clasifica el tipo de superficie dentro de 15 categorías de las cuales solo nos interesan: InteriorWall, ExteriorWall, Roof, Ceiling, InteriorFloor, RaisedFloor. Los cuales portan un identificador para posteriormente relacionarlos en la sección donde se almacena la información sobre los materiales constructivos, Layer y Material. Para extraer información sobre las ventanas, del elemento Surface se deriva otro llamado Opening el cual contiene la información sobre el tipo de ventana o apertura presente en la superficie. El diagrama 3.4.1 ilustra como cada una de estos elementos se relaciona en el esquema y en donde se encuentran las características de cada uno de los elementos para la parametrización del modelo.

En este punto es importante caracterizar el tipo de sugerencias que realiza el software con respecto a la selección de materiales de construcción. Las sugerencias consistirán en una serie de tres materiales distribuidos en capas, con los cuales se debe constituir un elemento que se usará para construir la fachada de la construcción. A continuación se realizará una breve descripción del tipo de fachadas que existen.

3.4.2. Fachadas

A los elementos que conforman la envoltura del edificio se les denomina fachada para los muros exteriores y cubierta para el techo. Estos son uno de los elementos más importantes de la construcción ya que son quienes están en contacto con la intemperie y cumplen la función de proteger a los usuarios de los fenómenos climatológicos como la lluvia, nevadas, radiación y viento. Existen diferentes tipos de fachada y se expondran a continuación:

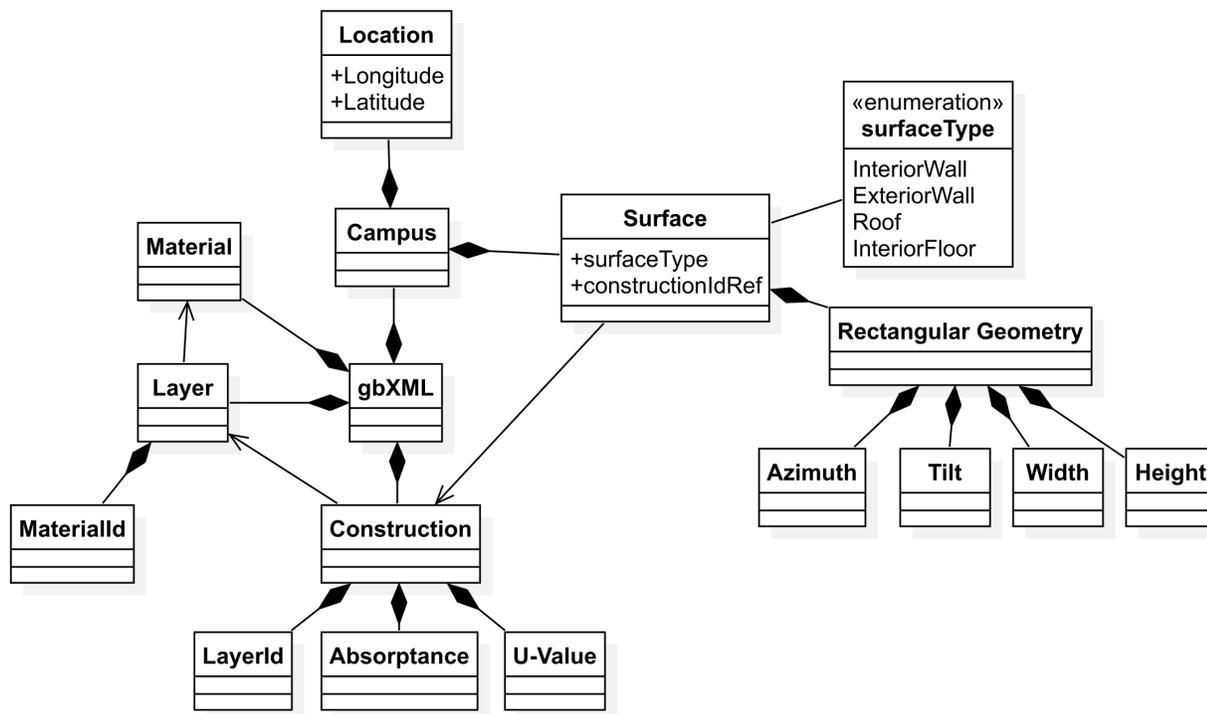


Figura 3-8.: Diagrama UML del esquema Green Building XML

Fachada pesada

Este tipo de fachadas suelen ser conformadas por elementos constructivos de elevado peso y para poder ser consideradas pesadas, estas deben pesar 100kg por m^2 . Dentro de esta categoría encontramos distintos tipos de fachadas que, según las necesidades de aislamiento térmico necesarias, pueden ser portantes o autoportantes y disponer de cámara de aire o no.

Fachada ligera

Es un tipo de fachada que se adhiere a la estructura resistente del edificio, pero que no forma parte de esta. La fachada ligera no contribuye a mejorar la estabilidad del edificio. Dentro de este tipo de fachadas, existen dos diferentes: muro cortina y fachada panel. En el muro cortina la fachada pasa de forma continua sobre los forjados de la estructura mientras que en el caso de la fachada panel esta se interrumpe en cada forjado.

Fachada SATE

SATE significa “Sistema de Aislamiento Térmico para el Exterior”. Consiste en la instalación, en la envolvente del edificio, de placas de material aislante protegidas por un mortero y adheridas comúnmente con adhesivos, aunque la fijación mecánica también arroja muy buenos resultados.

Fachada Prefabricada

Esta fachada hace alusión a un cerramiento que solo contiene módulos prefabricados que son unidos o ensamblados en la obra. Sus componentes son fabricados a nivel industrial, específicamente en naves mecanizadas. Por lo general, son instaladas fácilmente en edificaciones de grandes dimensiones, como las fábricas o los centros comerciales.

Fachada Tradicional

Estas son las fachadas más utilizadas en la historia, esto debido a que generalmente son económicas de construir y su proceso de construcción no requiere de manejo especializado de materiales de alta gama. Las fachadas tradicionales utilizan generalmente materiales como la piedra, la maderam, el ladrillo y el recubrimiento de cemento.

Existen nuevas estrategias y enfoques en la construcción de fachadas, sin embargo, las presentadas son las comunmente utilizadas.

Hasta este punto en la tesis no se ha mencionado ningún calculo estructural que respalde el cálculo de las fuerzas que pueden soportar la fachada o el techo de la construcción. Este tema no será tratado en esta tesis, por esta razón, es importante mencionar que las construcciones evaluadas por el software deben de tener un diseño estructural aporticado. En caso de no ser así, un nuevo estudio estructural se debe realizar posterior a la sugerencia de los materiales de construcción. El tipo de fachada que sugerirá el software para la envolvente del edificio serán muros de tipo panel, dentro de la categoría de fachadas ligeras. En caso de que el usuario no tenga la opción de construir los muros, el software mostrará las propiedades térmicas con las que debe contar el muro, de esta forma el usuario podra ajustar su propia estrategia para la construcción del mismo.

En el siguiente capítulo se mostrará la metodología de optimización para encontrar estas propiedades térmicas de los materiales óptimos para la construcción.

4. Esquemas de optimización

En este capítulo se presenta una metodología de optimización multiobjetivo para encontrar los materiales de construcción, la orientación, el tamaño de las ventanas y sus propiedades térmicas óptimas para maximizar el confort y minimizar el costo de los materiales de una construcción. Esta optimización se realiza en dos pasos, en el primer paso se encuentran las características térmicas óptimas de los materiales de la envolvente de la construcción: un par de valores de resistencia y capacitancia térmica para el techo, las paredes exteriores y las paredes interiores. Además, se encuentra la orientación óptima que disminuye el gasto energético, el tamaño de las ventanas, su resistencia y transmitancia de energía total. Todas estas características hacen parte del diseño pasivo de la construcción. En el segundo paso se utilizan los valores de resistencia y capacitancia obtenidos en el paso anterior para encontrar los materiales con las propiedades térmicas que mejor se ajusten, realizando un balance entre el costo de los materiales y el ajuste a estas propiedades.

En la siguiente sección se describirá la metodología para realizar la primera optimización.

4.1. Optimización del confort de la construcción

Antes de proceder a la descripción de la metodología es importante garantizar que la información climática represente totalmente el espectro de las dinámicas ambientales. Esta condición se debe satisfacer para todas las zonas climáticas, pero principalmente aquellas en las que hay diferentes estaciones en el transcurso del año, de esta forma el diseño pasivo de la construcción no quedará desbalanceado. Para evitar caer en este error, lo más apropiado es realizar simulaciones que comprendan la duración de todo un año. Esto puede representar gastos computacionales elevados, por esta razón, se escoge la metodología de modelado RC. En este sentido, es claro que, en el proceso de optimización, el modelo es evaluado múltiples veces. Por lo tanto y con el fin de mejorar el tiempo que tarda la optimización, se decide realizar un pre-procesamiento de las variables de entrada, con el objetivo que este procedimiento sea realizado una única vez. Como se vio en la sección 3.2.2, este procesamiento incluye parámetros como el ángulo de azimuth y la sombra producida por el toldo. Debido a que el ángulo de azimuth se encuentra dentro de las variables a tener en cuenta en el problema de optimización, se decide discretizar esta variable, es decir, se considerarán 12 valores para la variación del ángulo de azimuth (0, 30, 60 ...). En total se realiza un total de 24 simulaciones para generar los datos que contemplan todos los escenarios climáticos. Otra de las razones por las cuales se realizó este pre-procesamiento es la complejidad que puede

representar la inclusión de estas variables en el problema de optimización. Esta complejidad se debe a que para cada uno de los valores del ángulo de azimuth se genera un escenario climático diferente, lo que puede provocar la aparición de múltiples mínimos locales. Esta optimización se desarrolló en el software Python usando como algoritmo de optimización la Evolución Diferencial. Este algoritmo de optimización de naturaleza metaheurística se eligió por sus características presentadas en [52]:

- Eficiencia para optimizar funciones no lineales, no diferenciables y multiobjetivo.
- Es paralelizable.
- Su implementación es simple, reducidos parámetros de sintonización y costo computacional bajo en comparación con otros métodos metaheurísticos.
- Es robusto y tiene buenas propiedades de convergencia.

El problema de optimización se define mediante la siguiente expresión 4-1:

$$\begin{aligned}
 \min_x \quad & J = \|PPD\| \\
 \text{s.t.} \quad & R_{\min} \leq R_* \leq R_{\max}, \\
 & C_{\min} \leq C_* \leq C_{\max}, \\
 & A_{\text{win}_{\min}} \leq A_{\text{Win}} \leq A_{\text{win}_{\max}}, \\
 & 0 \leq g_{\text{win}} \leq 1, \\
 & 0 \leq R_{\text{win}} \leq 1,
 \end{aligned} \tag{4-1}$$

donde,

$$x = [R_{\text{ext}}, C_{\text{ext}}, R_{\text{floor}}, C_{\text{floor}}, R_{\text{roof}}, C_{\text{roof}}, A_{\text{win}}, R_{\text{win}}, g_{\text{win}}]$$

Observe que el objetivo de optimización es minimizar la norma dos del indicador PPD presentado en la Sección 2.2. Este indicador nos permite minimizar el número de personas insatisfechas en términos del confort. Además observe que las variables de decisión presentadas en la formulación del problema, pertenecen al conjunto de parámetros de la tabla **3-4**, con los que se definen las zonas térmicas en las librerías utilizadas.

Debido a que el algoritmo de optimización utilizado no contempla restricciones de igualdad o desigualdad en su funcionamiento, es necesario realizar un análisis de los valores de los límites superiores e inferiores de las variables de decisión. Para las resistencias y capacitancias de la envolvente térmica, es necesario realizar un análisis de los materiales de construcción con los que se cuenta. Como se mencionó en la sección 3.4.2, la metodología propone construir fachadas compuestas por paneles contruidos por tres capas de materiales y diferentes espesores. En el anexo A se presenta una tabla que contiene información sobre las propiedades

térmicas y sobre el precio estimado por m^2 de los materiales a considerar en esta tesis. Reunir esta información es una tarea difícil, pues esta información es sensible y confidencial para la mayoría de proveedores. Es de tener en cuenta además que las propiedades térmicas de los materiales dependen drásticamente del procedimiento de medición y de las condiciones medio ambientales en el momento de medición de las mismas, además varían dependiendo de la procedencia de los materiales. Por esta razón, es común encontrar diferente información sobre las propiedades térmicas del mismo material en distintas fuentes. El precio de los materiales presentados en la tabla son precios estimados que pueden carecer de precisión. Para encontrar el rango de valores para la resistencia y capacitancia térmica, se utilizan las ecuaciones presentadas en la sección 3.3.1 para encontrar la resistencia y capacitancia total que ofrece la combinación de las capas de los tres materiales. Las ecuaciones 4-2, 4-3 y 4-4 describen este cálculo.

$$R_T = \frac{1}{A} \frac{L_1 k_2 k_3 + L_2 k_1 k_3 + L_3 k_1 k_2}{k_1 k_2 k_3} \quad (4-2)$$

$$C_T = A(\rho_1 C_{p1} L_1 + \rho_2 C_{p2} L_2 + \rho_3 C_{p3} L_3) \quad (4-3)$$

$$L_T = L_1 + L_2 + L_3 \quad (4-4)$$

Las variables R_T , C_T y L_T corresponden a la resistencia térmica, capacitancia térmica y al espesor del muro total de la configuración de los materiales seleccionados respectivamente, los cuales presentan conductividades térmicas k_1 , k_2 y k_3 , densidades ρ_1, ρ_2 y ρ_3 , capacidades caloríficas C_{p1} , C_{p2} y C_{p3} y la misma área superficial A para todas las capas de material. Para encontrar entonces los límites, se plantea un problema de optimización en donde las variables $k_1, k_2, k_3, \rho_1, \rho_2, \rho_3, C_{p1}, C_{p2}$ y C_{p3} son variables que pertenecen al conjunto discreto determinado por la disponibilidad de materiales A. Y las variables L_1, L_2 y L_3 serán variables reales que estarán sujetas a una restricción, la cual es el espesor total del muro L_T . Es posible que dentro del conjunto de materiales disponibles se encuentren materiales que contienen propiedades térmicas muy dispersas con respecto al resto, esto puede provocar que los límites encontrados se sesguen por estos materiales. Por esta razón, se propone eliminar estos materiales para el hallazgo de los límites. Y se propone identificarlos mediante un análisis de dispersión de las propiedades térmicas de los materiales, por ejemplo, un histograma. La ecuación 4-5 describe el problema de optimización para encontrar el límite inferior R_{\min} . Para encontrar el límite superior R_{\max} , basta con colocar un signo negativo en la función de costo de la siguiente manera $J = -R_T$. El mismo procedimiento se sigue para encontrar los límites de capacitancia térmica. En la tabla 4.1 se definen los rangos de las variables de decisión.

$$\begin{aligned}
\min_x \quad & J = R_T \\
\text{s.t.} \quad & R_T = \frac{1}{A} \frac{L_1 k_2 k_3 + L_2 k_1 k_3 + L_3 k_1 k_2}{k_1 k_2 k_3}, \\
& C_T = A(\rho_1 C_{p1} L_1 + \rho_2 C_{p2} L_2 + \rho_3 C_{p3} L_3), \\
& L_T = L_1 + L_2 + L_3
\end{aligned} \tag{4-5}$$

donde,

$$x = [\rho_1, \rho_2, \rho_3, C_{p1}, C_{p2}, C_{p3}, L_1, L_2, L_3, k_1, k_2, k_3]$$

Variable de diseño	Descripción	Rango
R_{ext}	Resistencia térmica de las paredes exteriores	$(R_{\text{min}}, R_{\text{max}})$
C_{ext}	Capacitancia térmica de las paredes exteriores	$(C_{\text{min}}, C_{\text{max}})$
R_{floor}	Resistencia térmica de las paredes interiores	$(R_{\text{min}}, R_{\text{max}})$
C_{floor}	Capacitancia térmica de las paredes interiores	$(C_{\text{min}}, C_{\text{max}})$
R_{roof}	Resistencia térmica de la cubierta	$(R_{\text{min}}, R_{\text{max}})$
C_{roof}	Capacitancia térmica de la cubierta	$(C_{\text{min}}, C_{\text{max}})$
A_{win}	Área de las ventanas	Definido por el usuario
R_{win}	Resistencia térmica de las ventanas	$(0.1, 10)$
g_{win}	Transmitancia total de energía de las ventanas	$(0.1, 1)$

Tabla 4-1.: Rangos para las variables de decisión del primer paso en el proceso de optimización

En la Figura 4-1 se muestra un diagrama de flujo que explica el proceso de optimización. Se parte con la generación de una primera población que se encuentra dentro de los límites establecidos, esta primera población se genera aleatoriamente por el algoritmo de optimización.

Luego se escribe un archivo inicial de OpenModelica, el cual contiene el modelo térmico de la construcción listo para compilar. Este archivo se puede escribir manualmente o se puede generar mediante el software “Nest Designer” desarrollado en el marco de esta tesis. La compilación se realiza desde el software Python mediante la API OMPython, tal y como se describe en la sección 3.4. Del proceso de compilación resulta un conjunto de archivos dentro de los cuales se encuentra un archivo de iniciación de tipo XML, que tiene como nombre, el nombre del modelo junto con ‘‘_init.xml’’, este archivo contiene todos los parámetros del modelo y mediante este se cambiarán los valores de las variables de decisión del problema de optimización, para posteriormente simular el modelo. De la simulación se obtiene el indicador de confort PPD de Fanger mencionado en la sección 2.2. La norma dos de este vector será la función de costo para el problema de optimización. Una vez se

haya encontrado el óptimo global para ese escenario climático, se almacena el conjunto de variables de decisión para realizar un análisis posterior descrito en la sección 4.2. Una vez se haya encontrado el óptimo global para cada uno de los 26 escenarios climáticos, uno para cada valor del ángulo de azimuth y la inclusión del toldo, se procede a seleccionar realizar un análisis de estos resultados descrito en la sección 4.2.

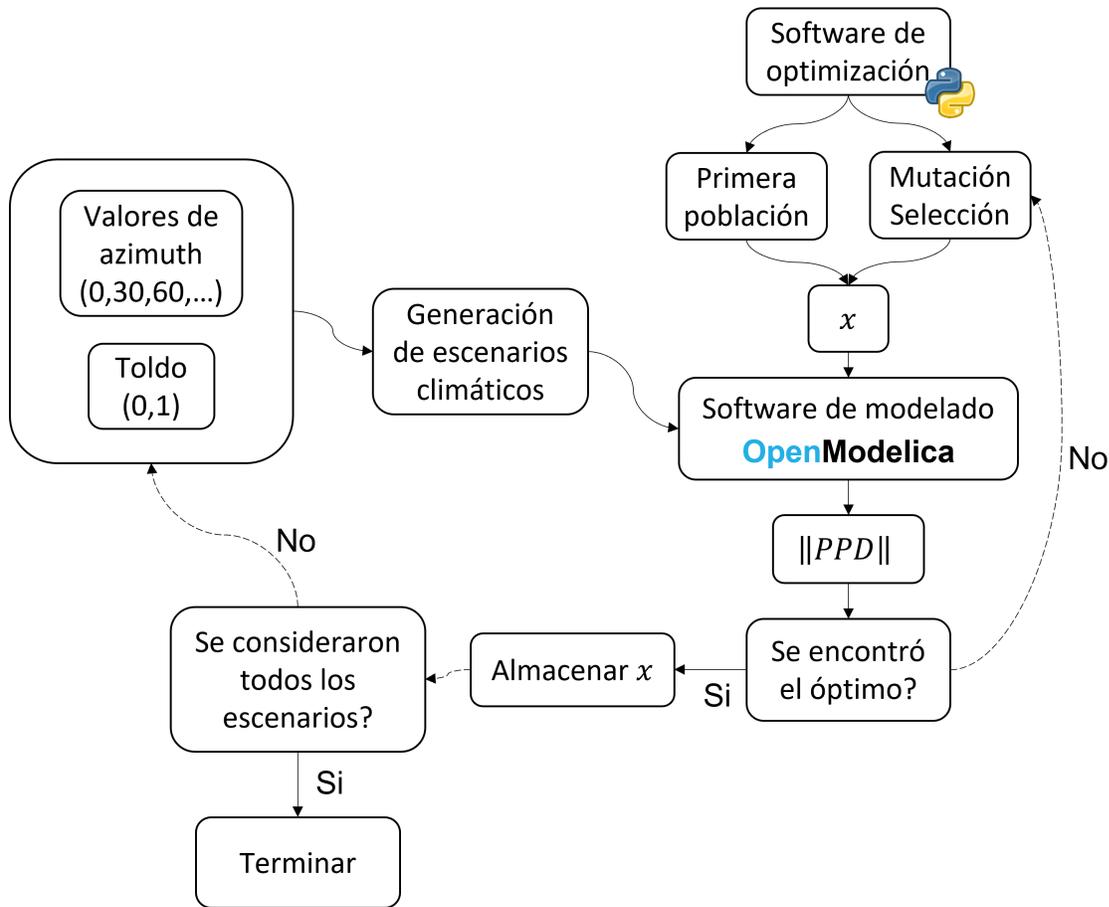


Figura 4-1.: Diagrama de flujo del proceso de optimización

4.2. Optimización para la selección de los materiales constructivos

Una vez obtenidos el set de conjuntos de variables de decisión. Se procede a calcular los materiales para construir cada una de las capas de los paneles pertenecientes a la fachada y a la cubierta. Consiguiendo un indicador que estima el precio por metro cuadrado de cada uno de los componentes de la envolvente. Este cálculo se realiza mediante el planteamiento de un problema de optimización presentado en la ecuación 4-6.

$$\begin{aligned}
& \min_{R, C, L_1, L_2, L_3} J = \|R_{Opt} - R\| + Precio + \|C_{Opt} - C\| \\
& \text{s.t.} \quad R = \frac{1}{A} \frac{L_1 k_2 k_3 + L_2 k_1 k_3 + L_3 k_1 k_2}{k_1 k_2 k_3}, \\
& \quad C = \rho A L C_p, \\
& \quad L = L_1 + L_2 + L_3, \\
& \quad P = L_1 P_1 + L_2 P_2 + L_3 P_3
\end{aligned} \tag{4-6}$$

Es importante recalcar que debido a que el orden de magnitud de las variables que se encuentran en la función objetivo es tan diferente, se recomienda realizar una normalización de los mismos. Para este caso, se dividieron todos los valores de resistencia entre R_{max} , los valores de capacitancia por C_{max} y el precio es dividido entre el material de mayor precio. Como se puede observar en la formulación del problema de optimización 4-6, conseguir información precisa y acertada sobre los materiales de construcción se vuelve un factor fundamental para adquirir una estimación correcta del panel óptimo para las condiciones térmicas y su precio por metro cuadrado. Esta información es sensible y confidencial para cada uno de los proveedores de materiales constructivos. Además, esta información no es invariable para el tipo de material, debido a que cada proveedor maneja diferentes calidades y presentaciones que alteran las propiedades térmicas del material. Por lo tanto, se recomienda integrar al proveedor de los materiales dentro del proceso de diseño. Para resumir el proceso de optimización, se presenta un diagrama de flujo en la figura 4-2.

Como se observa en el diagrama, después de encontrar los materiales de construcción y realizar una estimación del precio por metro cuadrado del panel. Se procede a realizar una nueva simulación en la que se añade el sistema de aclimatación térmica, generando así un indicador para la cantidad de energía utilizada en un año. Finalmente se genera una tabla que contiene los óptimos para cada una de las diferentes orientaciones de la construcción y la inclusión o exclusión del toldo. En este punto, es necesario proponer un criterio de evaluación de parte del usuario o el arquitecto para seleccionar la configuración que más se ajuste a sus preferencias.

En el siguiente capítulo se propone un criterio de evaluación y se analizan los resultados obtenidos en esta tesis.

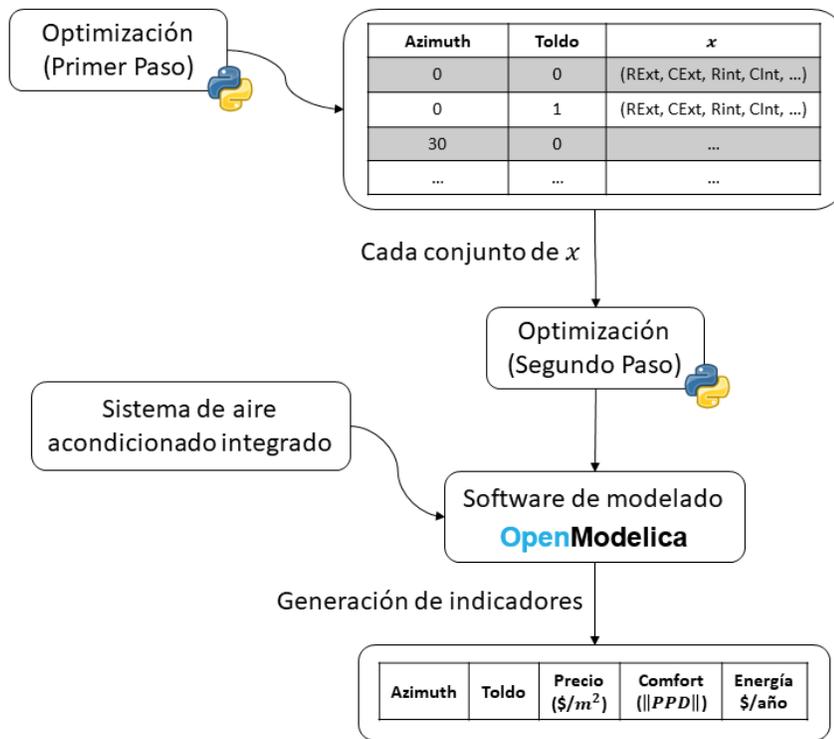


Figura 4-2.: Diagrama de flujo del proceso de optimización

5. Resultados y análisis

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos tras aplicar la metodología de optimización propuesta en el Capítulo 4. El caso de estudio es el caso de prueba presentado en la Sección 3 y descrito totalmente en la Sección 5.2.1 de la norma ANSI/ASHRAE 140-2001. Como se mencionó en la Sección 4.1, lo primero que se debe realizar para llevar a cabo la metodología es encontrar los límites superiores e inferiores de los valores de resistencia y capacitancia térmica a partir de la tabla de materiales disponibles, ver Anexo A.

5.1. Primer paso de la metodología de optimización

Con el fin de encontrar los límites para la búsqueda de las propiedades térmicas óptimas que deben tener los materiales de construcción, es necesario identificar aquellos materiales que presenten propiedades térmicas dispersas con respecto al resto de los materiales. Para esto se realizaron histogramas presentados en la Figura 5-1 y en la Figura 5-2 en donde claramente se identifican dos materiales que presentan características particulares. En la Figura 5-2 la manta de aerogel de sílice corresponde al material que presenta una conductividad térmica alta con respecto al resto de los materiales. Por otro lado, en la Figura 5-1 es el acero inoxidable el que presenta una capacidad calorífica volumétrica considerablemente alta con respecto a las presentadas por el resto de los materiales. Estos dos materiales son excluidos del análisis, con el fin de consolidar los límites de búsqueda de las propiedades térmicas óptimas de los materiales.

De esta forma, en la Tabla 5.1 se resumen los límites encontrados para cada uno de los componentes de la construcción. Estos deben ser diferentes para el techo, piso y paredes exteriores debido a que estas propiedades son dependientes del área superficial y del espesor del material.

Como se mencionó en el capítulo 4 definir estos límites de forma precisa es indispensable para garantizar la participación de todos los elementos constructivos en la construcción de los paneles para la envolvente térmica. Si se omite este paso, es posible que los óptimos se encuentren únicamente utilizando estos materiales con propiedades dispersas, y si eso pasa, la segunda optimización carecería de relevancia. Pues al menos uno de los materiales quedaría sesgado a usar ese material y se perdería en gran parte la oportunidad de minimizar la inversión inicial por ejemplo.

Con los límites de las variables de decisión, se cuenta con todos los elementos necesarios para proceder con la primera optimización. Para no saturar el documento con información

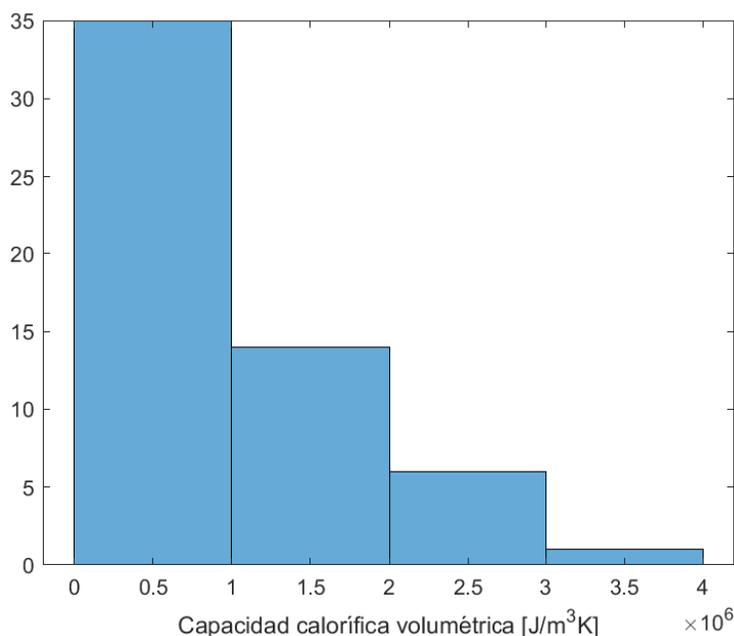


Figura 5-1.: Histograma para el análisis de dispersión de la capacidad calorífica volumétrica de los materiales

redundante y provocar confusión, se presentará el procedimiento para el mismo ángulo de azimuth y para una rotación de 60° en todas la paredes exteriores y la ventana, sin la inclusión del toldo. Este escenario fue el que presentó mejores resultados. En la tabla **5-2** se resumen los óptimos encontrados.

Una vez encontradas las características óptimas del diseño pasivo para cada uno de los escenarios de simulación, se procede con el segundo paso de la optimización 4.2.

5.2. Segundo paso de la metodología de optimización

En este paso se obtienen los materiales óptimos para cada uno de los escenarios climáticos lo cual permite generar un valor estimado del precio por metro cuadrado de la construcción. En la Tabla **5-3** se resumen los datos sobre los materiales obtenidos para las paredes exteriores, en la Tabla **5-4** se resumen los datos sobre los materiales obtenidos para el techo y en la Tabla **5-5** se resumen los datos sobre los materiales obtenidos para el piso. Cada uno para los escenarios de simulación planteados.

En el caso de las ventanas, se consultó un conjunto de ejemplares presentados en la tabla **5-6**. El procedimiento para escoger la ventana es un poco mas sencillo debido a que en esta tesis no se contempla el desarrollo de una metodología para la configuración de las ventanas. Por lo tanto, se elige la ventana que se acerque a los valores obtenidos en la simulación. Como se puede observar, los materiales encontrados no son necesariamente materiales dife-

Variable de diseño	Descripción	Rango
R_{ext}	Resistencia térmica de las paredes exteriores	(0.0466, 0.3380)
C_{ext}	Capacitancia térmica de las paredes exteriores	$(2.2 \cdot 10^4, 1 \cdot 10^6)$
R_{floor}	Resistencia térmica del piso	$(0.0972 \cdot 10^{-4}, 0.7987)$
C_{floor}	Capacitancia térmica del piso	$(1.301 \cdot 10^6, 5.44 \cdot 10^7)$
R_{roof}	Resistencia térmica de la cubierta	$(0.0160 \cdot 10^{-4}, 0.1094)$
C_{roof}	Capacitancia térmica de la cubierta	$(1.2378 \cdot 10^5, 8.2 \cdot 10^6)$
A_{win}	Área de las ventanas	(0,12)
R_{win}	Resistencia térmica de las ventanas	(0, 1)
g_{win}	Transmitancia total de energía de las ventanas	(0.1,1)

Tabla 5-1.: Rangos para las variables de decisión del primer paso en el proceso de optimización

Azimuth	fun	R_{ext}	C_{ext}	R_{floor}	C_{floor}	R_{roof}	C_{roof}	A_{win}	R_{win}	g_{win}
0	155.86	0.0466	114940	0.0972	2975413	0.016	8091846	11.1	0.49	0.291
60	153.87	0.0466	513815	0.098	23613927	0.016	8191204	5.07	0.724	0.55

Tabla 5-2.: Resultados de la primera optimización

Azimuth	R	C	$R_{\text{Opt}} - R$	$C_{\text{Opt}} - C$	Precio [\$/m ²]	Materiales	Espesores [cm]
0	0.0517	114390	-0.0983	-550	62631	L, VE, CY	0.1,7.82,0.86
60	0.0422	513805	0.0044	9.703	99930	CC, C, Y	7.26,0.38,1.05

Tabla 5-3.: Materiales encontrados y sus características para las paredes exteriores. Donde L hace referencia a Ladrillo, VE a la vermiculita expandida, CY al cartón de yeso, CC al concreto celular, C a la celulosa y Y al yeso.

Azimuth	R	C	$R_{\text{Opt}} - R$	$C_{\text{Opt}} - C$	Precio [\$/m ²]	Materiales	Espesores [cm]
0	0.0156	8090812	0.0004	1034	139241	CC, PE, LM	1.41,1.54,11.13
60	0.0159	8190607	5.00E-05	596	136209	L, PE, LM	1.41,1.62,11.05

Tabla 5-4.: Materiales encontrados y sus características para el techo. Donde CC hace referencia al concreto celular, PE al poliestireno expandido, LM al ladrillo usado en mampostería y L al ladrillo

Azimuth	R	C	$R_{\text{Opt}} - R$	$C_{\text{Opt}} - C$	Precio [\$/m ²]	Materiales	Espesores [cm]
0	0.368	2954633	-0.271	20780	1178541	CC, CR, TD	10.57,78.33,13.91
60	0.118	23613551	-1.98E-02	376	1004609	L, VE, CY	10.85,31.77,60.19

Tabla 5-5.: Materiales encontrados y sus características para el piso. Donde CC hace referencia al concreto celular, CR a la celulosa reciclada, y TD a las tierras diatomeas, L al ladrillo, VE a la vermiculita expandida y CY al cartón de yeso.

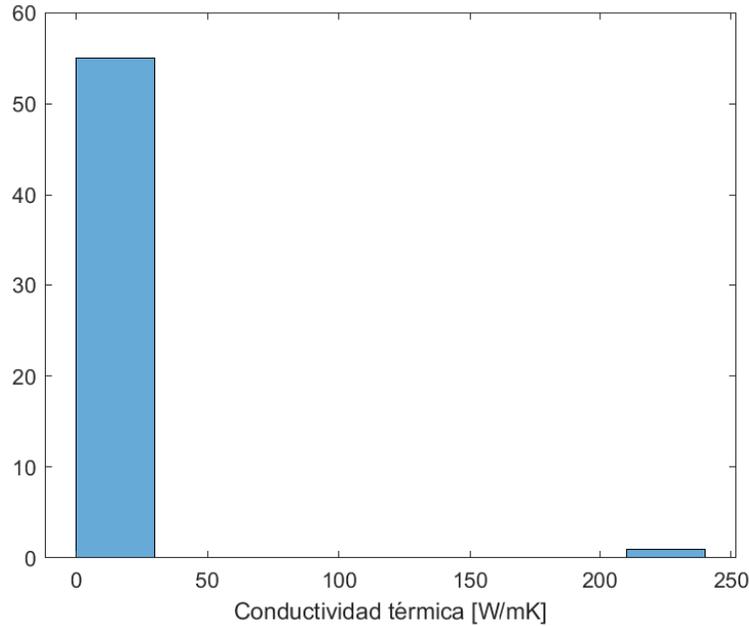


Figura 5-2.: Histograma para el análisis de dispersión de la conductividad térmica de los materiales

Tipo de Ventana	R [m ² K/W]	g _{win}	Precio [\$/m ²]
Doble acristalamiento con relleno de aire, revestimiento de baja emisividad, marco de aluminio	0.323625	0.69	1113737
Vidrio doble tintado con relleno de aire, revestimiento de baja emisividad, marco de PVC	0.512821	0.38	1158287
Doble acristalamiento selectivo con relleno de aire, revestimiento de baja emisividad, marco de PVC	0.543478	0.43	1158287
Doble acristalamiento con relleno de argón, revestimiento de baja emisividad, marco de PVC	0.526316	0.69	1158287
Vidrio doble tintado con relleno de argón, revestimiento de baja emisividad, marco de PVC	0.581395	0.37	1202836
Doble acristalamiento selectivo con relleno de argón, revestimiento de baja emisividad, marco de PVC	0.628931	0.43	1202836
Triple acristalamiento con relleno de argón, revestimiento de baja emisividad, marco de PVC	0.740741	0.58	1291935

Tabla 5-6.: Resumen de los tipos de ventanas, encontradas en [4]

rentes a los usos comunmente en el contexto nacional e internacional.

En la comunidad constructiva, al menos en el contexto nacional, es habitual descartar la idea de diseñar óptimamente una construcción desde el punto de vista energético, debido a que se cree que esto conlleva a elevados costos en la inversión inicial. Por esto, se considera la metodología oportuna con el objetivo de romper este mito en la comunidad constructiva. Posteriormente se realiza una simulación en la que se integra un control de temperatura simulado mediante un esquema de control PI para estimar la carga de refrigeración y calefacción anual y obtener un indicador de consumo de energía eléctrica. El controlador mantiene la temperatura entre 20 y 27°C, rango de temperatura establecido en la norma ASHRAE para sus casos de estudio de prueba. El indicador que se usará para caracterizar el consumo energético, será la cantidad de energía acumulada en un año medida en MWh utilizada por el equipo de aclimatación térmica. En las Figuras 5-3 y 5-4, se presentan las curvas que representan el acumulado de las cargas térmicas a lo largo del año y en la Tabla 5-7 se

resume esta información. En las gráficas se observan cuatro curvas, unas distinguidas por triángulos representando la carga térmica de calentamiento y otras distinguidas por asteriscos representando la carga de enfriamiento. Y para distinguir un escenario del otro, se usan los colores rojo y azul.

	Azimuth	Confort	Carga de calentamiento	Carga de enfriamiento	Total Carga
Inicial	0	43.8215	5.96199	-6.36556	12.32755
Final	0	38.5521	1.0155	-2.5925	3.608
Final	60	38.6006	1.007	-1.7814	2.7884

Tabla 5-7.: Resumen de los indicadores de las configuraciones obtenidas y la inicial

Como se puede observar, la disminución en la carga térmica obtenida para los dos casos planteados es superior al 70%. Y aunque en esta tesis no se muestran los resultados para los demás escenarios de simulación, todos presentaron resultados similares. Y es que para cualquier escenario planteado, se pueden encontrar materiales constructivos que optimicen el gasto energético dentro de la construcción. En este punto el criterio de selección de la configuración del diseño pasivo depende solo del usuario. Debido a que puede preferir una orientación en especial, algún tipo de material o acabado para la construcción, el ahorro energético, el precio de la construcción o incluso preferir otras alternativas tras realizar un análisis sobre otras propiedades de los materiales que se ajusten a las preferencias del usuario. Por ejemplo, el aislamiento acústico, la vida útil de los materiales, etc. En este trabajo el criterio de selección será la carga energética anual. Es la razón por la cual se escogió el escenario de simulación con una rotación en los ángulos de azimuth de las superficies de 60° y sin la inclusión del toldo.

Seguidamente, para evidenciar las mejoras obtenidas mediante la intervención en el diseño pasivo, en la figura 5-5 se presenta una comparación entre la temperatura interior sin la operación de sistemas de calefacción ni refrigeración entre la configuración inicial y la obtenida por la metodología. Para poder observar el cambio en la temperatura interior, se escoge una ventana de tiempo en el que se contemplan 11 días de simulación.

Las dinámicas térmicas en el interior del escenario seleccionado, presentan resultados positivos no sólo en términos del confort, el cual fue el objetivo de optimización en el primer paso de la optimización. Sinó también a nivel energético, y es que el consumo energético es directamente proporcional a la falta de confort de los habitantes de la construcción. Lo cual se pudo evidenciar en la revisión del estado del arte, en donde se encontró que más del 50% de la energía utilizada en el sector residencial se debe a dispositivos de aclimatación térmica. Esta es la razón del planteamiento del esquema de optimización, para lograr una disminución representativa en el consumo energético es necesario proporcionar confort a sus usuarios a priori.

En este capítulo se pudo evidenciar los resultados tras aplicar la metodología propuesta en

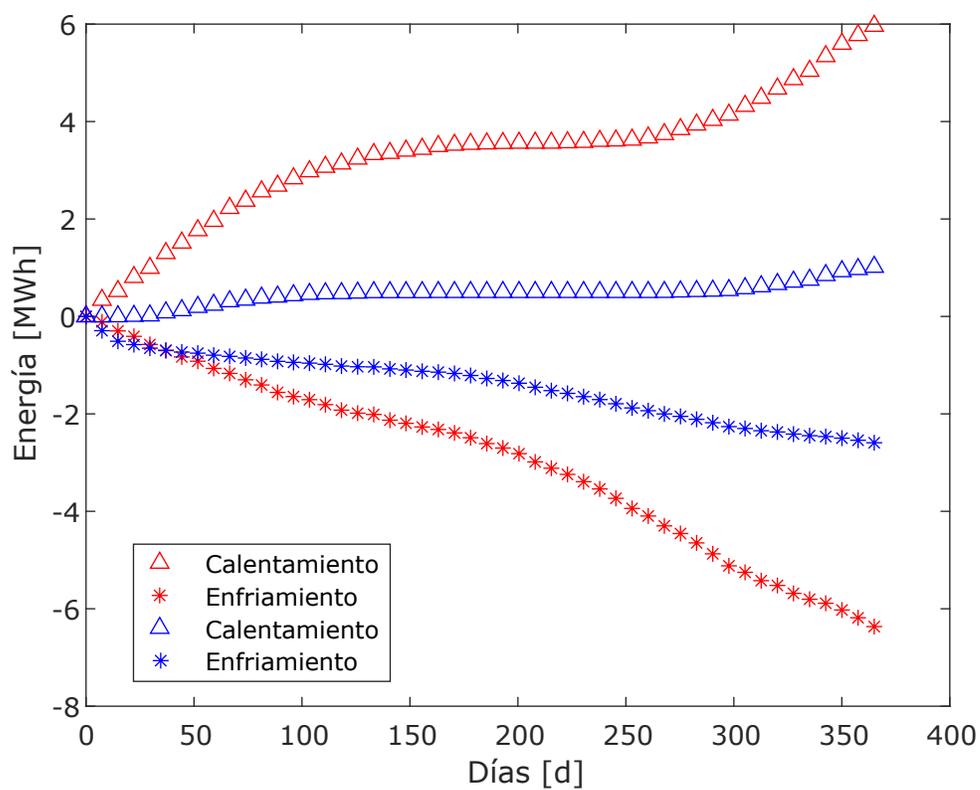


Figura 5-3.: Comparación entre las cargas térmicas entre la configuración inicial (rojo) y la configuración obtenida de la metodología (azul) sin cambiar el ángulo de azimuth

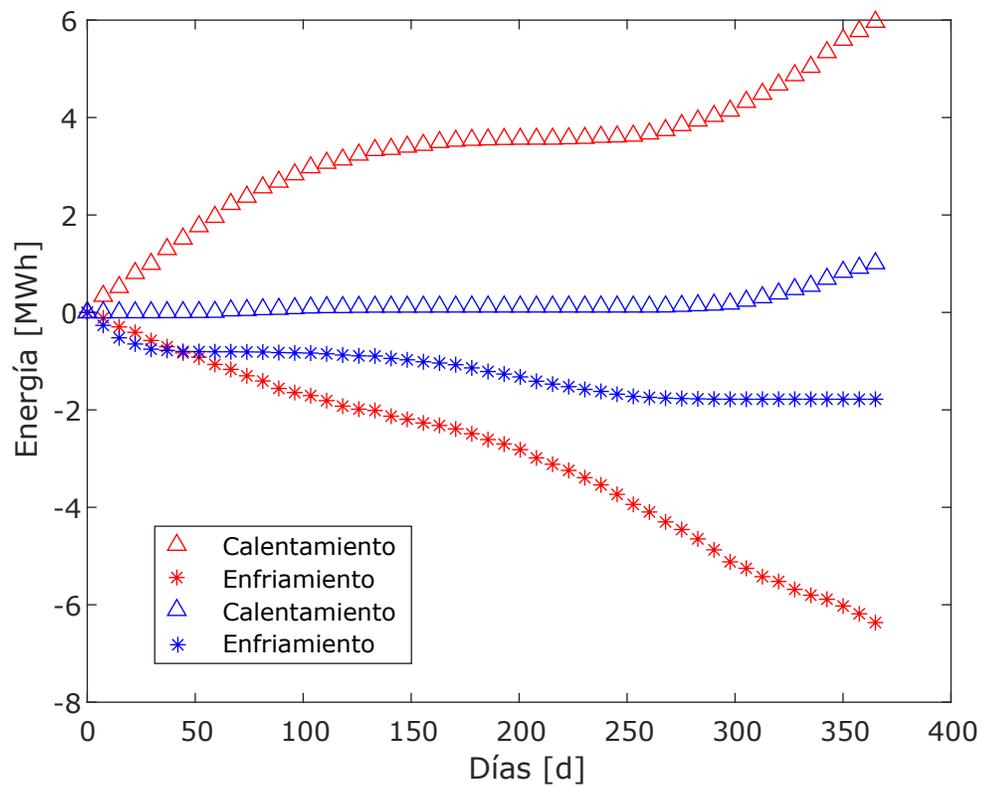


Figura 5-4.: Comparación entre las cargas térmicas entre la configuración inicial (rojo) y la configuración obtenida de la metodología (azul) con una rotación en el ángulo de azimuth de 60 grados

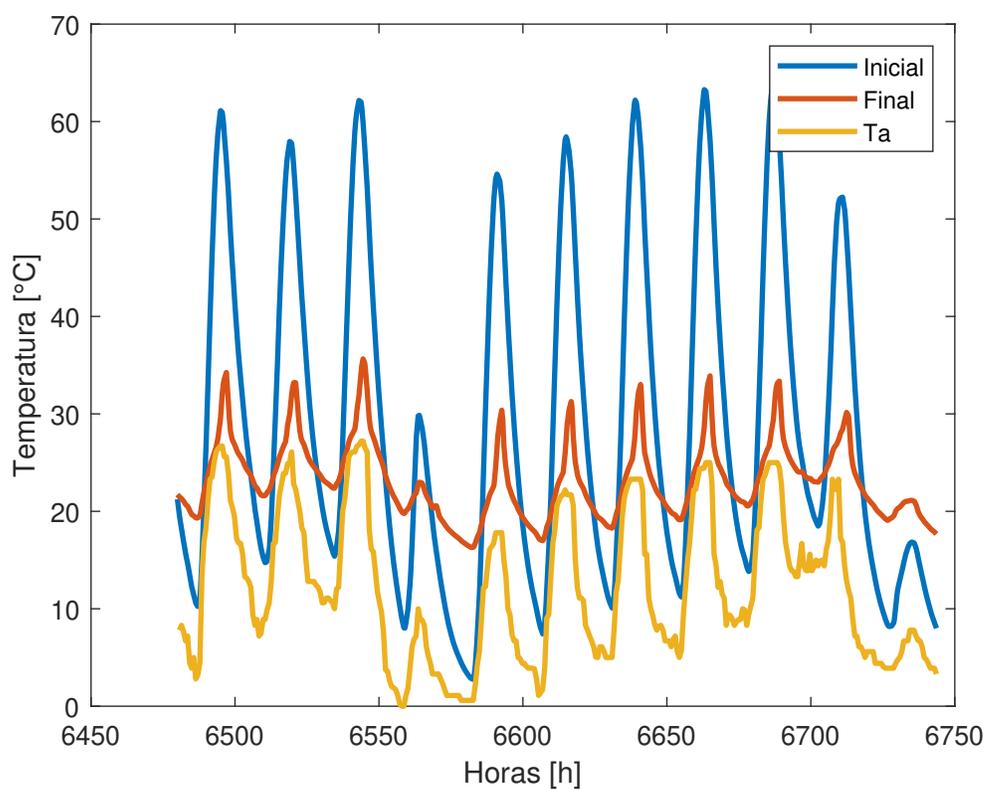


Figura 5-5.: Comparación de las dinámicas de temperatura entre la configuración inicial, final y temperatura ambiente en una ventana de tiempo de 11 días seleccionados aleatoriamente.

la misma en el caso de estudio propuesto. Se obtuvo una disminución del consumo de energía eléctrica de hasta un 83 % para la carga térmica de calentamiento y una disminución del 72 % para la carga térmica de refrigeración. En vista de estos resultados, se puede reafirmar que la inclusión de un estudio riguroso en el diseño pasivo de una construcción es fundamental para disminuir el consumo energético y optimizar el confort en el interior de la construcción. En el siguiente capítulo se presentaran algunas conclusiones obtenidas tras el análisis de estos resultados.

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

Esta tesis fue desarrollada en el marco del proyecto Energética 2030 en el objetivo P02 sobre construcciones sostenibles. En primera instancia, se hizo una revisión de la literatura en donde se identificó al sector residencial como el responsable del 40 % de la energía consumida mundialmente. Además, se expuso el preocupante panorama en el contexto colombiano en cuanto a los planes y estrategias para sobre llevar esta carga energética. En vista de esto, se desarrolló una herramienta metodológica para contribuir con el problema energético. Esta herramienta tiene como propósito brindar soporte al diseño activo y pasivo en una construcción, mediante una metodología de optimización basada en simulación. Los objetivos de optimización y las variables de decisión se establecieron mediante la identificación de la carencia de los mismos observado en la revisión de literatura. El confort, la inversión económica inicial y el consumo energético son los objetivos de optimización de este problema, en tanto, las variables de decisión son básicamente los elementos pertenecientes al diseño pasivo de la construcción.

En el proceso de construcción de la herramienta, el primer paso es encontrar la metodología de modelado energético de la construcción. Para ello, se realizó una revisión sobre las metodologías utilizadas en este contexto y se seleccionó la de resistencia y capacitancia térmica. Esta ha sido utilizada ampliamente en la literatura y ha demostrado ser una herramienta eficaz en términos del esfuerzo computacional sin pérdidas considerables de desempeño en la estimación. En esta tesis se pudo validar la metodología en un caso de estudio presentado en la sección 5.2.1 de la norma ANSI/ASHRAE 140-2001, llamado Caso de Estudio 600. Los datos para realizar la validación se encontraron dispuestos en la librería Aixlib desarrollada en el marco del proyecto IEA EBC Anexo 60 en el lenguaje Modelica. En la validación se encontraron errores medios del 1.87 % con desviaciones del 1.42 %, se considera que este error es aceptable y se consolida la metodología de modelado. Las librerías Aixlib y Buildings contienen modelos en sus librerías muy útiles para la estimación del consumo energético en una construcción, modelos que fueron utilizados en el desarrollo de esta tesis.

En el proceso de diseño de una construcción sostenible, es imperativo realizar un riguroso diseño pasivo de la construcción. En este trabajo se evidenció que se pudo reducir hasta en un 77 % la carga térmica de la construcción. Proponiendo una configuración que no necesariamente es la más costosa en términos de los materiales constructivos. Los resultados obtenidos superaron las expectativas en cuanto a la disminución de la carga térmica, demostrando que

la metodología es eficaz y oportuna.

En esta tesis se desarrolló una herramienta que representa un aporte significativo dentro de las iniciativas actuales para disminuir el consumo de energético en el sector residencial. Esta herramienta se diseñó para ser escalable y flexible de tal forma que comprenda cualquier tipo de construcción y que permita incorporar diferentes análisis además del térmico. Además se construyó una herramienta diseñada para los profesionales que participan en el proceso de diseño de la construcción, debido a que la herramienta tiene la capacidad de realizar un análisis energético utilizando únicamente el diseño 3D de la construcción. Esto mediante el desarrollo del parser a partir el esquema gbXML.

Proveer una herramienta para escoger los materiales constructivos ideales energéticamente para una construcción, es también uno de los aportes importantes que se están realizando en esta tesis. Para la herramienta, el contexto socioeconómico nacional es un aspecto clave a tener en cuenta para poder proveer una solución accesible. Por esto, la herramienta tiene la capacidad de proveer un equilibrio entre el costo de los materiales de la construcción y el ahorro energético que puede definir el usuario.

También se pueden realizar algunas conclusiones con respecto al desarrollo de la metodología diseñada:

- La metodología de modelado de resistencia y capacitancia térmica presentó ser una buena alternativa para proponer soluciones basadas en métodos de optimización ya que su generalidad no le permite perder tanta precisión a un bajo costo computacional.
- La metodología para agilizar el tiempo de cómputo mediante el preprocesamiento de las variables meteorológicas fue bastante efectiva y puede causar un mayor impacto en una construcción en la que se desee analizar más de una zona térmica al tiempo.
- Se logró desarrollar una metodología flexible que admite no sólo las variables de decisión propuestas en esta tesis, sino también, cualquier componente perteneciente al diseño pasivo o a la operación de la construcción. Como ejemplo la absorción de las paredes, el rango en de operación del aire acondicionado, entre otros.

6.2. Recomendaciones

Es importante contar con una base de datos que represente de manera acertada las propiedades térmicas de los materiales constructivos y el costo de los mismos para tener éxito en la implementación de la metodología.

En la implementación del software en un caso real, se debe procurar que el diseño 3D de la construcción lleve toda la información posible acerca de todos los elementos involucrados en la construcción, desde los hábitos en el uso de los electrodomésticos en la construcción, hasta la información sobre las propiedades térmicas de los materiales.

A. Anexo: Tabla de materiales disponibles

Material	Tipo	Conductividad térmica	Capacidad calorífica	Densidad	Precio	Referencias
Mortero de cemento	Base	0.93	1050.3	1800.2	41500	[59]
Ladrillo	Base	0.456	580.5	1615.6	19200	
Poliestireno expandido	Aislante	0.0287	1501.4	10.6	47500	
Poliestireno extruido	Aislante	0.0316	1625.6	29.7	47500	
Lana de vidrio	Aislante	0.0361	807.1	48	11900	
Resina Fenólica	Aislante	0.0361	1932.1	35.6	65000	
Lana mineral de roca	Aislante	0.0435	656.6	124.9	25000	
Manta de aerogel de sílice	Aislante	0.0054	1057	200	107000	[58]
Fibra de madera	Base	0.038	2100	160	45000	
Celulosa	Aislante	0.04	2020	50	40000	
Cáñamo	Aislante	0.06	1600	275	35800	
Aerogel	Aislante	0.014	1000	150	67000	
Poliisocianurato	Aislante	0.025	1500	40	27500	[16]
Madera	Base	0.13	1600	600	68000	
Cartón de yeso	Base	0.21	1000	900	34850	
Tablero de fibra de madera	Base	0.04	1400	120	29845	
Silicato de calcio	Aislante	0.05	790	150	70000	-
Vermiculita	Aislante	0.065	1000	200	9000	-
Arcilla expandida	Aislante	0.113	1300	450	60000	[9]
Celulosa reciclada	Aislante	0.04	1381	35	34850	
Madera de roble	Base	0.21	2090	700	180000	
Pino abeto	Base	0.12	1500	450	27000	
OBS	Base	0.11	1700	595	45874	
Abeto negro de quebec	Base	0.12	2500	536	75874	
Abeto	Base	0.13	1600	500	38000	
Mortero de cemento 2	Base	0.93	669	1920	41500	-
Ladrillo al cromo	Base	2.32	840	3000	68400	-
Ladrillo de arcilla	Base	0.814	921	1800	19200	-
Ladrillo de magnesio	Base	2.68	1130	2000	68400	-
Ladrillo de mamposteria	Base	0.658	837	1700	16250	-
Aire	Aislante	0.026	1063	1.223	0	-
Poliuretano	Aislante	0.026	1400	30	25000	-
Poliuretano 2	Aislante	0.0316	1625	29.7	47500	-
Espuma fenólica	Aislante	0.038	1400	30	50180	-
Corcho comprimido	Base	0.085	2000	540	66000	-
Madera construcción	Base	0.13	1360	630	150000	-
Madera de pino	Base	0.148	2512	640	150000	-
Madera pesada	Base	0.2	1250	700	150000	-
Concreto celular	Base	0.33	880	800	25600	-
Yeso	Base	0.488	837	1440	6586	-
Concreto pesado	Base	1.75	920	2300	5000	-
Piedra	Base	1861	712	2250	120000	-
Marmol	Base	2.9	800	2590	200000	-
Aluminio 1100	Base	222	839	2739	600000	-
Acero inoxidable	Base	15.6	456	7913	840000	-

Tabla A-1.: Tabla de materiales recopilados

Bibliografía

- [1] A review and outlook for integrated BIM application in green building assessment. En: *Sustainable Cities and Society* 48 (2019), p. 101576. – ISSN 2210–6707
- [2] AHI, Payman ; SEARCY, Cory: A comparative literature analysis of definitions for green and sustainable supply chain management. En: *J. Clean. Prod.* 52 (2013), p. 329–341. – ISSN 09596526
- [3] AKBA, Tufan ; BAKER, Derek ; GÜVENÇ YAZICIOĞLU, Almıla: Modeling, transient simulations and parametric studies of parabolic trough collectors with thermal energy storage. (2020)
- [4] ASCIONE, Fabrizio ; BIANCO, Nicola ; MAURO, Gerardo M. ; NAPOLITANO, Davide F.: Building envelope design: Multi-objective optimization to minimize energy consumption, global cost and thermal discomfort. Application to different Italian climatic zones. En: *Energy* 174 (2019), p. 359–374. – ISSN 03605442
- [5] ATHIENITIS, Andreas ; BRIEN, William O.: *Andreas Athienitis William O ' Brien Optimization of Net-Zero Energy Buildings Related Titles Solar and Heat Pump Systems for Residential Buildings Performance Based Building Design 2 Solution Sets for Net Zero Energy Buildings Performance Based.* 2015. – ISBN 9783433030400
- [6] BIYIK, Emrah ; ARAZ, Mustafa ; HEPBASLI, Arif ; SHAHRESTANI, Mehdi ; YAO, Runming ; SHAO, Li ; ESSAH, Emmanuel ; OLIVEIRA, Armando C. ; DEL CAÑO, Teodosio ; RICO, Elena ; LECHÓN, Juan L. ; ANDRADE, Luisa ; MENDES, Adélio ; ATLI, Yusuf B.: A key review of building integrated photovoltaic (BIPV) systems. En: *Engineering Science and Technology, an International Journal* 20 (2017), Nr. 3, p. 833–858. – ISSN 22150986
- [7] BRE, Facundo ; FACHINOTTI, Víctor D.: A computational multi-objective optimization method to improve energy efficiency and thermal comfort in dwellings. En: *Energy and Buildings* 154 (2017), p. 283–294. – ISSN 03787788
- [8] BUXEY, D.: *Solar Water Heaters..* Vol. 2. Elsevier Inc., 1980. – 793–801 p.. – ISBN 9780128114797

- [9] CANIATO, Marco ; MARZI, Arianna ; MONTEIRO DA SILVA, Sandra ; GASPARELLA, Andrea: A review of the thermal and acoustic properties of materials for timber building construction. En: *Journal of Building Engineering* 43 (2021), p. 103066. – ISSN 2352–7102
- [10] CASTILLA, M. ; ÁLVAREZ, J. D. ; ORTEGA, M. G. ; ARAHAL, M. R.: Neural network and polynomial approximated thermal comfort models for HVAC systems. En: *Build. Environ.* (2013). – ISSN 03601323
- [11] DAVID, Miguel ; LÓPEZ, Rojas ; ARANGO, Carlos R. ; BASTIDAS, Lina: Modelamiento del ciclo de la construcción en Colombia mediante dinámica de sistemas *. 15, Nr. 29, p. 43–62
- [12] DELGARM, Navid ; SAJADI, Behrang ; DELGARM, Saeed: Multi-objective optimization of building energy performance and indoor thermal comfort: A new method using artificial bee colony (ABC). En: *Energy and Buildings* 131 (2016), p. 42–53. – ISSN 03787788
- [13] DIEGO-MAS, Jose A.: Evaluación del confort térmico con el método de Fanger. (2015)
- [14] DIEZ, F J. ; NAVAS-GRACIA, L M. ; MARTÍNEZ-RODRÍGUEZ, A ; CORREA-GUIMARAES, A ; CHICO-SANTAMARTA, L: Modelling of a flat-plate solar collector using artificial neural networks for different working fluid (water) flow rates. (2019)
- [15] DUFFIE, John A. ; BECKMAN, William A.: *Wiley: Solar Engineering of Thermal Processes, 4th Edition - John A. Duffie, William A. Beckman.* 2013. – 936 p.. – ISBN 978-1-118-41541-2
- [16] OF EUROPEAN RIGID POLYURETHANE FOAM ASSOCIATIONS, Federation. *Thermal insulation materials made of rigid polyurethane foam (PUR/PIR) Properties-Manufacture.* 2006
- [17] EVANGELISTI, Luca ; DE LIETO VOLLARO, Roberto ; ASDRUBALI, Francesco: Latest advances on solar thermal collectors: A comprehensive review. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 114 (2019), Nr. August, p. 109318. – ISSN 18790690
- [18] FAJARDO CUADRO, Juan G. ; SARRIA LÓPEZ, Bienvenido ; ÁLVAREZ GUERRA PLASENCIA, Mario: Estudio exergético del espacio climatizado en una embarcación fluvial. En: *Ing. Eléctrica* 36 (2015), Nr. 2, p. 127–135. – ISSN 02535645
- [19] FANGER, Povl O.: Calculation of Thermal Comfort, Introduction of a Basic Comfort Equation. En: *Ashrae Transactions* 73 (1967)

-
- [20] FINE, Jamie P. ; NGUYEN, Hiep V. ; FRIEDMAN, Jacob ; LEONG, Wey H. ; DWORKIN, Seth B.: A simplified ground thermal response model for analyzing solar-assisted ground source heat pump systems. (2018)
- [21] GANESON, Anand K. ; FRITZSON, Peter A. ; ROGOVCHENKO, Olena ; ASGHAR, Adeel ; SJÖLUND, Martin ; PFEIFFER, Andreas: An OpenModelica Python Interface and its use in PySimulator, 2012
- [22] GARDE, François ; DONN, Michael: IEA SHC Task 40 / EBC Annex 52 Towards Net Zero Energy Solar Buildings: A review of 30 Net ZEBs case studies. En: *International Energy Agency (IEA)* (2014), Nr. May, p. 130
- [23] HAN, Jingyang ; CUI, Minghui ; CHEN, Junyi ; LV, Wenjuan: Analysis of thermal performance and economy of ground source heat pump system: a case study of the large building. (2020)
- [24] HEGEDUS, S: *Photovoltaic Science*. 2003. – 0–471 p.. – ISBN 0471491969
- [25] HUIDE, Fu ; XUXIN, Zhao ; LEI, Ma ; TAO, Zhang ; QIXING, Wu ; HONGYUAN, Sun: A comparative study on three types of solar utilization technologies for buildings: Photovoltaic, solar thermal and hybrid photovoltaic/thermal systems. En: *Energy Conversion and Management* 140 (2017), p. 1–13. – ISSN 01968904
- [26] ILBEIGI, Marjan ; GHOMEISHI, Mohammad ; DEGHANBANADAKI, Ali: Prediction and optimization of energy consumption in an office building using artificial neural network and a genetic algorithm. En: *Sustainable Cities and Society* 61 (2020), p. 102325. – ISSN 22106707
- [27] INEICHEN, Pierre ; PEREZ, Richard ; SEALS, Robert: The importance of correct albedo determination for adequately modeling energy received by tilted surfaces. En: *Solar Energy* 39 (1987), Nr. 4, p. 301–305. – ISSN 0038–092X
- [28] ISHAQUE, Kashif ; SALAM, Zainal ; TAHERI, Hamed: Simple, fast and accurate two-diode model for photovoltaic modules. (2010)
- [29] JELLE, Bjørn P. ; BREIVIK, Christer: State-of-the-art building integrated photovoltaics. En: *Energy Procedia* 20 (2012), Nr. 1876, p. 68–77. – ISBN 9781627484299
- [30] KHALID, Chennoufi ; MOHAMMED, Ferfra ; MOHCINE, Mokhlis: Journal Pre-proof An accurate modelling of PV Modules based on two-diode model CRediT author statement An accurate modelling of PV Modules based on two-diode model. (2020)
- [31] KHALIFA, Abdul-Jabbar N.: Natural convective heat transfer coefficient – a review: I. Isolated vertical and horizontal surfaces. En: *Energy Conversion and Management* 42 (2001), Nr. 4, p. 491–504. – ISSN 0196–8904

- [32] KLOEPFFER, Walter: Life cycle sustainability assessment of products (with Comments by Helias A. Udo de Haes, p. 95). En: *International Journal of Life Cycle Assessment* Vol. 13, Springer Verlag, 3 2008. – ISSN 09483349, p. 89–95
- [33] LAUSTER, Moritz ; CONSTANTIN, Ana ; REMMEN, Peter ; FUCHS, Marcus ; MÜLLER, Dirk: Verification of a low order building model for the modelica library aixlib using ashrae standard 140. En: *Building Simulation Conference Proceedings* 5 (2017), p. 2525–2534. – ISBN 9781510870673
- [34] LO BRANO, Valerio ; ORIOLI, Aldo ; CIULLA, Giuseppina ; GANGI, Alessandra D.: An improved five-parameter model for photovoltaic modules. En: *Solar Energy Materials and Solar Cells* 94 (2010), p. 1358–1370
- [35] LUO, Na ; PRITONI, Marco ; HONG, Tianzhen: An overview of data tools for representing and managing building information and performance data. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 147 (2021), 9. – ISSN 18790690
- [36] MÉNDEZ, Ana ; ALBA, Pazos ; MARTÍN, Sáez ; APLICADA, Macroeconomía: Desarrollo sostenible y economía: una mirada hacia el futuro. 2007. – Informe de Investigación
- [37] BY MICHAEL ; POLAK, Elijah ; CHAIR P VAN CAREY, Co ; CHAIR M ALICE AGOGINO ALEXANDRE J CHORIN, Co. *Simulation-Based Building Energy Optimization Committee in charge*. 2004
- [38] MICHAILIDIS, Iakovos T.: Balancing Energy Efficiency with Indoor Comfort. (2020), p. 1–28
- [39] MÜLLER, Dirk ; REMMEN, Peter ; CONSTANTIN, Ana ; LAUSTER, Moritz ; FUCHS, Marcus: AixLib - An Open-Source Modelica Library within the IEA-EBC Annex60 Framework, 2016
- [40] NAYAK, Byamakesh ; MOHAPATRA, Alivarani ; MOHANTY, Kanungo B.: Parameter estimation of single diode PV module based on GWO algorithm. En: *Renewable Energy Focus* 30 (2019)
- [41] NDIAYE, Demba: Simplified Model for Dynamic Simulation of Solar Systems with Evacuated Tube Collector. En: *Procedia Engineering* 118 (2015), p. 1250–1257. – ISBN 1704687160
- [42] PABLO-ROMERO, María del P. ; POZO-BARAJAS, Rafael ; YÑIGUEZ, Rocío: Global changes in residential energy consumption. En: *Energy Policy* 101 (2017), Nr. September, p. 342–352. – ISSN 03014215
- [43] PEARCE, David: Is the construction sector sustainable?: Definitions and reflections. En: *Build. Res. Inf.* (2006). – ISSN 09613218

- [44] PEREZ, Richard ; SEALS, Robert ; INEICHEN, Pierre ; STEWART, Ronald ; MENICUCCI, David: A new simplified version of the perez diffuse irradiance model for tilted surfaces. En: *Solar Energy* 39 (1987), Nr. 3, p. 221–231. – ISSN 0038–092X
- [45] PIPPIA, Tomas ; LAGO, Jesus ; CONINCK, Roel D. ; SCHUTTER, Bart D.: Scenario-based Nonlinear Model Predictive Control for Building Heating Systems. (2020). – ISSN 03787788
- [46] PIPPIA, Tomas ; LAGO, Jesus ; CONINCK, Roel D. ; SIJS, Joris ; SCHUTTER, Bart D.: Scenario-based model predictive control approach for heating systems in an office building. En: *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering* 2019-Augus (2019), p. 1243–1248. – ISBN 9781728103556
- [47] RAZMARAY, Meysam ; MAASOUMY, Mehdi ; SHAHBAKHTIY, Mahdi ; ROBINETT, Rush D.: Exergy-based model predictive control for building HVAC systems. En: *Proc. Am. Control Conf.* July (2015), p. 1677–1682. – ISBN 9781479986842
- [48] RODRÍGUEZ, JOHN ALEXANDER P.: *PROPUESTA DE UN SISTEMA DE INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD EN CONSTRUCCIONES PARA EL MUNICIPIO DE IBAGUÉ, PERIODO 2016 – 2030.*, UNIVERSIDAD DE MANIZALES, Tesis de Grado, 2018. – 121 p.
- [49] SCHLUETER, Arno ; THESELING, Frank: Building information model based energy/exergy performance assessment in early design stages. En: *Autom. Constr.* 18 (2009), Nr. 2, p. 153–163. – ISSN 09265805
- [50] SHARIF, Seyed A. ; HAMMAD, Amin: Simulation-Based Multi-Objective Optimization of institutional building renovation considering energy consumption, Life-Cycle Cost and Life-Cycle Assessment. En: *Journal of Building Engineering* 21 (2019), p. 429–445. – ISSN 23527102
- [51] SONG, Yingjie ; WU, Daqing ; DENG, Wu ; GAO, Xiao-Zhi ; LI, Taiyong ; ZHANG, Bin ; LI, Yuangang: MPPCEDE: Multi-population parallel co-evolutionary differential evolution for parameter optimization. En: *Energy Conversion and Management* 228 (2021), p. 113661
- [52] STORN, Rainer ; PRICE, Kenneth: Differential Evolution - A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces. En: *Journal of Global Optimization* 11 (1997), 01, p. 341–359
- [53] SWAN, Lukas G. ; UGURSAL, V. I. *Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques.* 2009

-
- [54] TORÍO, Herena ; ANGELOTTI, Adriana ; SCHMIDT, Dietrich. *Exergy analysis of renewable energy-based climatisation systems for buildings: A critical view*. 2009
- [55] TUSHAR, Quddus ; BHUIYAN, Muhammed A. ; ZHANG, Guomin ; MAQSOOD, Tariq: An integrated approach of BIM-enabled LCA and energy simulation: The optimized solution towards sustainable development. En: *Journal of Cleaner Production* 289 (2021), p. 125622. – ISSN 09596526
- [56] VISENTIN, Caroline ; WILLIAM DA, Adan ; TRENTIN, Silva ; BRAUN, Adeli B.: Life cycle sustainability assessment: A systematic literature review through the application perspective, indicators, and methodologies. (2020)
- [57] VOGEL, J ; KELLER, M ; JOHNSON, M: Numerical modeling of large-scale finned tube latent thermal energy storage systems. (2020)
- [58] WANG, Yingying ; LIU, Kang ; LIU, Yanfeng ; WANG, Dengjia ; LIU, Jiaping: The impact of temperature and relative humidity dependent thermal conductivity of insulation materials on heat transfer through the building envelope. En: *Journal of Building Engineering* 46 (2022), p. 103700. – ISSN 2352–7102
- [59] WANG, Yingying ; ZHANG, Sudan ; WANG, Dengjia ; LIU, Yanfeng: Experimental study on the influence of temperature and humidity on the thermal conductivity of building insulation materials. En: *Energy and Built Environment* (2022). – ISSN 2666–1233
- [60] YAHYA-KHOTBEHSARA, Amin ; SHAHHOSEINI, Ali: A fast modeling of the double-diode model for PV modules using combined analytical and numerical approach. (2018)
- [61] YANG, Ming ; WANG, Zhifeng ; CHEN, Longfei ; TANG, Wenxue: Dynamic heat transfer model of flat plate solar water collectors with consideration of variable flow rate. En: *Solar Energy* 212 (2020), p. 34–47
- [62] YONG, Zhang ; LI-JUAN, Yuan ; QIAN, Zhang ; XIAO-YAN, Sun: Multi-objective optimization of building energy performance using a particle swarm optimizer with less control parameters. En: *Journal of Building Engineering* 32 (2020), p. 101505. – ISSN 23527102
- [63] ZHANG, Yiying ; JIN, Zhigang ; MIRJALILI, Seyedali: Generalized normal distribution optimization and its applications in parameter extraction of photovoltaic models. (2020)