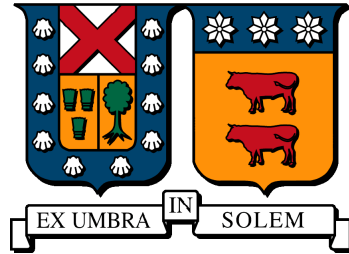


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO-CHILE



**Simulación térmica integrada de una habitación
calefaccionada con un sistema de alimentación
hibrido**

Álvaro Valenzuela

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA : Ph.D Rodrigo Sebastián Barraza Vicencio.
PROFESOR CORREFERENTE : Ph.D Jorge Alfredo Ardila Rey

Septiembre 2018

Agradecimientos

Agradecer solo en estas líneas no es fácil por que este documento no solo refleja el proyecto de desarrollo de nanored y gestión de energía, sino que implica también la obtención del título de Ingeniero Civil Mecánico proceso muy largo en el cual muchas personas se han hecho parte y me disculpo de antemano si es que hay personas que se me quedan en el tintero.

Primero empezar con las personas involucradas el proyecto de título a mi profesor guía Rodrigo Barraza muchas gracias por la paciencia y el apoyo en cada etapa del proyecto, sus consejos siempre fueron de muchas utilidad y se agradece la gran cantidad de tiempo entregado en este trabajo, agradecer también a mi profesor correferente, Jorge Ardila por las gestiones realizadas para el correcto funcionamiento del trabajo de título y a don Gerardo Aravena por toda la colaboración en el montaje experimental. Agradecer de igual forma a Ian Teitelman y Federico Castillo por su asesoría en la recolección de datos.

Se agradece a los integrantes del equipo microredes del Departamento de Ingeniería Eléctrica por su contribución en el proyecto Nicolás Medina, Leonel Lizama, Rodrigo Morales y Antonio Parejo. También se da las gracias por el apoyo en utilización del programa TRNSYS a Yohan Cerda y Esteban Ayala. En la edición del documento se agradece especialmente el aporte y paciencia de Catherine Valenzuela, Viviana Ávila y Ricardo Guzmán. Agradecer a mis profesores, compañeros y amigos que fueron parte de este proceso. En especial mencionar a Pablo Paredes, Ricardo Guzmán, Paulo Salgado, Carlos Chacón, Felipe Benítez, Enrique Ahumada, Raymundo Valverde, Claudio Gaete, Yerko Espinosa, Diego Oñate, Ignacio Gonzales, Fabián Sánchez, Christian Monsalvone, Kevin Silva, Camila Ordenes y Eny Medina.

Por último, pero no menos importante agradecer a mis padres por las infinitas posibilidades que me han dado y a su cariño incondicional, aprecio enormemente todos los sacrificios que ha hecho por mí durante todos estos años, también dar las gracias a mis hermanas Nicole y Catherine por todo su apoyo emocional y entrega.

Resumen

En la actualidad existe un gran interés tanto en la industria como en el sector público por la implementación de energías renovables no convencionales (ERNC) y el uso eficiente de estas. Una de las tantas aplicaciones que tienen estos conceptos en nuestra sociedad es la utilización de un sistema de generación distribuida, en el cual el lugar de consumo de la carga se encuentra cercano al lugar de obtención de potencia, remediando así problemas tales como grandes pérdidas de energía a lo largo de una red centralizada y mantenimiento de esta. Para hacer más eficiente el control entre las cargas y la producción de potencia se utilizan estructuras como las nanoredes.

Este trabajo de título tiene por objetivo desarrollar un modelo térmico transiente de una habitación del tipo nodal en el programa TRNSYS, el cual está en interacción con un sistema de climatización y es contrastado con datos empíricos. Se realiza la calibración del modelo obteniendo errores porcentuales menores al 7 % en los perfiles de temperatura de pared y temperatura ambiente en el laboratorio. Se realizó un análisis de sensibilidad con respecto a las variables de entrada del modelo resultado con una influencia del 17 % en un rango de variación de un 50 % de los parámetros de entrada.

El modelo es utilizado para estimar la carga térmica mensual en un año meteorológico típico en conjunto con la energía necesaria para lograr distintas temperaturas de consigna. Además se simula el potencial de generación de un sistema PV y una turbina de viento.

Posterior a la validación del modelo térmico se utilizará como parte de un modelo predictivo para la optimización de la estrategia de control de una nanored en el Departamento de Ingeniería Eléctrica (DIE) de la Universidad Ferderico Santa María, Campus San Joaquín.

Abstract

At present, there is great interest in both the industry and the public sector for the implementation of non-conventional renewable energies (ERNC) and the efficient use of these. One of the many applications that these concepts have in our society is the use of a distributed generation system, in which the place of consumption of the load is close to the place of obtaining power, thus remedying problems such as large losses of power energy throughout a centralized network and maintenance of this. To make the control between the loads and the production of power more efficient, structures such as nanoredes are used.

The objective of this document is to develop a transient thermal model of a nodal room in the TRNSYS program, which is in interaction with an air conditioning system and this is contrasted with empirical data. The calibration of the model is performed obtaining percentage errors less than 7 % in the profiles of wall temperature and ambient temperature in the laboratory. A sensitivity analysis was performed with respect to the input variables of the result model with an influence of 17 % in a variation range of 50 % of the input parameters.

The model is used to estimate the monthly thermal load in a typical meteorological year together with the energy needed to achieve different setpoint temperatures. It also simulates the generation of a PV system and a wind turbine.

After validation of the thermal model, it will be used as part of a predictive model to optimize the control strategy of a nanored in the Department of Electrical Engineering (DIE) of the Federico Santa María University.

Glosario

Lista de abreviaturas

ASHRAE	American Society of Heating Refrigerating and Air-conditioning Engineers
CFD	Computational Fluid Dynamic
CFT	Conduction Transfer Function
DIE	Departamento Ingeniera Eléctrica DRF
GHI	Global Horizontal Irradiance
ERNC	Energías Renovables No Convencionales
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning
LMHC	Hypercube Monte Carlo
PMV	Predicted mean Vote
PPD	Percentage Dissatisfied
PV	Photovoltaic
RESNET	Residential Energy Services Network
SS	State-Space
SVM	Support Vectors Machine
TRNBuild	TRNSYS application software
TRNSYS	Transient System Simulation
WT	Wind Turbine

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Objetivo general	2
1.2. Objetivos específicos	2
2. Estado del arte	3
2.1. Desarrollo de modelado de edificios y predicción de rendimientos energéticos	3
2.1.1. Método estadístico	5
2.1.2. Método ingenieril	6
2.1.3. Método híbrido	6
2.2. Desarrollo modelos térmicos en edificios	6
2.2.1. Método CFD	7
2.2.2. Método zonal	7
2.2.3. Método multizona o nodal	9
3. Metodología de medición	19
3.1. Parámetros de interés	19
3.2. Equipos de medida y registro de datos	20
3.3. Medición en la habitación	21
3.4. Medición exterior	23
3.5. Otros parámetros de medición	24
3.6. Tabla resumen error instrumental	24
3.7. Protocolo de medición	25
3.7.1. Mediciones de la habitación sin sistema de climatización	25
3.7.2. Mediciones de la habitación con sistema de climatización (Modo Aire Acondicionado)	26
3.7.3. Mediciones de la habitación con sistema de climatización (Modo Bomba de Calor)	27
4. Descripción del modelo	29
4.1. Descripción física del modelo	29
4.2. Descripción modelo TRNSYS	30

4.2.1.	Parámetros ambientales	31
4.2.2.	Ganancias internas	34
4.2.3.	Elementos de generación	36
5.	Calibración y validación del modelo	40
5.1.	Sistema HVAC	45
5.1.1.	Bomba de calor	45
5.1.2.	Aire acondicionado	46
6.	Resultados y validación	48
6.1.	Estudio de sensibilidad del modelo	48
6.2.	Tiempo de respuesta térmica.	49
6.2.1.	Aire acondicionado	49
6.2.2.	Bomba de calor	51
6.3.	Potencial de generación y perfil de carga	54
7.	Conclusiones y recomendaciones	57
7.1.	Conclusiones	57
7.2.	Recomendaciones	58
	Bibliografía	59
A.	Intrumentos de medición	64
B.	Planos edificio	68
C.	Perfil de carga térmica y consumo eléctrico mensual	73

Índice de figuras

2.1. Clasificación para modelos de estimación. Elaboración propia basada en el modelo de Fumo (2014)	4
2.2. Representación física de un muro (a), Discretización de un muro (b) obtenido del autor Boyer (1996)	10
2.3. Analogía eléctrica de la figura 2.2 obtenido del autor Boyer (1996) . . .	10
2.4. Modelo de funciones de transferencia. Manual Trnsys 17.	11
2.5. Esquema de una zona (calefaccionado por convección) con un modelo de Star-network y circuito equivalente Norton para las paredes. Ali Saberi Derakhtenjani en William O'Brien (2015)	16
2.6. Esquema de un muro multicapa y su circuito equivalente Norton. Ali Saberi Derakhtenjani en William O'Brien (2015)	16
2.7. Esquema de circuito con modelo de intercambio radiativo-conductivo por separado. Figura extraída de Ali Saberi Derakhtenjani en William O'Brien (2015)	17
3.1. Ubicación del edificio.	20
3.2. Edificio del DIE , modelo TRNSYS (a), Laboratorio memoristas (b). . .	21
3.3. Puntos de medición con TRNSYS	21
3.4. Medición de temperatura de pared.	22
3.5. Montaje medición estratificación térmica en la habitación.	22
3.6. Piranómetros utilizados para medir radiación global horizontal.	23
3.7. Amplificador de señal para voltaje.	24
3.8. Diagrama de validación modelo sin sistema de refrigeración.	26
3.9. Diagrama de validación modelo con uso de la habitación de estudio y con sistema de refrigeración.	27
3.10. Diagrama de validación modelo con uso de la habitación de estudio y con sistema de bomba de calor con una temperatura de consigna de 23 [°C].	27
4.1. Diagrama de modelo térmico en Simulation Studio. Elaboración propia.	30
4.2. Circuito equivalente de 4 parámetros. Cortesía Klein(2006) manual Trnsys 17.	36

4.3.	Curva de potencia modelo MAX-1600W, empresa MAX sunning wind	39
5.1.	Comparación de temperatura ambiente simulada y medida en el laboratorio después de la calibración en la segunda semana de Febrero sin utilización de aire acondicionado.Utilizando infiltraciones 0.03[1/h]	42
5.2.	Comparación de temperatura simulada y medida después de la calibración para las diferentes superficies y humedad relativa en el laboratorio en la segunda semana de Febrero sin utilización de aire acondicionado.Utilizando infiltraciones 0.03[1/h]	43
5.3.	Temperatura de ambiental del laboratorio con infiltración de 1 [1/h] y en ausencia de estas en la segunda semana de febrero sin utilización de aire acondicionado.	44
5.4.	Temperatura de pared y humedad relativa en simulación incluyendo infiltraciones en la segunda semana de Febrero sin utilización de aire acondicionado.	45
5.5.	Ciclo genérico de bomba de calor y esquema de bomba de calor.	45
5.6.	Temperatura del laboratorio medida y simulada con utilización de bomba de calor.	46
5.7.	Consumo eléctrico bomba de calor medido y simulado.	46
5.8.	Temperatura del laboratorio medida y simulada con utilización de aire acondicionado.	47
6.1.	Análisis de sensibilidad de la temperatura del laboratorio con respecto a las variables ambientales.	48
6.2.	Temperatura del laboratorio medida y simulada con utilización de aire acondicionado.	50
6.3.	Encendido de aire acondicionado a distintas horas del día.	50
6.4.	Temperatura del laboratorio medida y simulada con utilización de una bomba de calor.	52
6.5.	Temperatura del laboratorio medida y simulada con utilización de una bomba de calor.	52
6.6.	Perfil de carga térmica mensual debido a la calefacción y aire acondicionado para distintas temperaturas de consigna.	54
6.7.	Perfil de consumo eléctrico y potencial de generación mensual en un año típico.	55
A.1.	Transmisor para riel DIN utilizado para conexión PT100	64
A.2.	Ficha técnica sensor de Humedad y temperatura	65
A.3.	Ficha técnica sensor de Humedad Tinytag	66
A.4.	Ficha técnica sensor de temperatura Tinytag	67

B.1. Plano vista superior planta alta del edificio	68
B.2. Plano vista superior planta baja del edificio	69
B.3. Plano vista superior subterráneo del edificio	70
B.4. Edificio vista en corte	71
B.5. Edificio con elementos de sombreado	72

Índice de tablas

3.1. Sensibilidad piranómetro.	23
3.2. Tabla resumen error instrumental	25
3.3. Fecha realización mediciones	26
4.1. Ganancias internas debido a actividad dentro de a sala de estudio.	35
4.2. Características aire acondicionado tipo mini split marca TRANE modelo MWW0518G	35
4.3. Datos eléctricos Panel solar Silicio- policrystalino, empresa Hareon solar modelo HR-315W.	37
4.4. Características turbina de viento modelo MAX-1600W, empresa MAX sunning wind	38
5.1. Rangos de transmitancia térmica del tipo de superficie	41
5.2. Valor de transmitancia por superficie obtenidos en la calibración	42
5.3. Error porcentual y diferencia máxima en el modelo calibrado.	43
6.1. Tiempo de respuesta en el encendido de aire acondicionado para una temperatura de consigna 22[°C].	51
6.2. Tiempo de respuesta en el encendido de la bomba de calor para una temperatura de consigna 20[°C].	53
6.3. Carga térmica anual en [kWh] para diferentes temperaturas de consigna.	55
6.4. Consumo eléctrico anual para distintas temperatura de consigna y porcentaje de generación PV con respecto al consumo anual	56
C.1. Carga térmica mensual en [kWh] para diferentes temperaturas de consigna.	73
C.2. Consumo eléctrico y potencial de generación en [kWh] durante un año típico para distintas temperaturas de consigna	74

Capítulo 1

Introducción

En la actualidad existe un gran interés tanto en la industria como en el sector público por la implementación de energías renovables no convencionales (ERNC) y el uso eficiente de estas. Una de las tantas aplicaciones que tienen estos conceptos en nuestra sociedad es la utilización de un sistema de generación distribuida, en el cual el lugar de consumo de la carga se encuentra cercano al lugar de obtención de potencia, remediando así problemas tales como grandes pérdidas a lo largo de una red centralizada y mantenimiento de esta. Para hacer más eficiente el control entre las cargas y la producción de potencia se utilizan estructuras como las nanoredes.

De acuerdo con el autor Burmester (2017) se define nanored como un sistema de distribución de energía para una casa o edificio, con la capacidad de conectarse o desconectarse a diferentes entidades de generación de potencia (locales y/o externas), a través de una puerta de enlace. Además, es posible complementar con sistemas de almacenamiento de energía y/o un sistema de control [1] .

Esta memoria de título se enmarca en el proyecto “Desarrollo y aplicación de sistema de gestión de energía para nanoredes - implementación piloto, Campus San Joaquín”. El proyecto tiene por finalidad desarrollar el modelo térmico transiente de una habitación, con énfasis en la interacción entre los sistemas de climatización, las características constructivas de una edificación, suministro eléctrico de la red, generación propia de electricidad usando recurso solar y almacenamiento de energía eléctrico y/o térmico.

1.1. Objetivo general

El objetivo general de esta memoria es desarrollar y contrastar el modelo térmico transiente de una habitación el cual está en interacción con un sistema de climatización alimentado con un sistemas híbrido.

1.2. Objetivos específicos

Para cumplir con el objetivo general se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Analizar el estado del arte de modelos térmicos.
- Diseñar una metodología para medir las condiciones actuales que definen el confort térmico de la habitación.
- Construir un modelo térmico transiente que simule el comportamiento de la habitación incluyendo las características constructivas y que incluya el efecto de los cambios de parámetros ambientales en las cargas térmica.
- Validar el modelo térmico con datos reales tomados experimentalmente en la habitación a estudiar.
- Estudiar el consumo energético de un sistema de climatización convencional versus alternativas que compatibilicen el uso de energías renovables en base al modelo térmico validado.

Capítulo 2

Estado del arte

Este capítulo tiene por objetivo presentar el estado bibliográfico de los tipos de modelos térmicos utilizados en edificios residenciales y comerciales.

2.1. Desarrollo de modelado de edificios y predicción de rendimientos energéticos

El consumo energético de los edificios es un tópico altamente estudiado en la actualidad, un ejemplo de la importancia de esta área es que en Chile el consumo de energía de los sectores Comercial, Público y Residencial representan alrededor de un 26,4 % del uso a nivel nacional [2]. La necesidad de crear alguna forma de cuantificar las variaciones térmicas de un edificio, tanto para el confort de los ocupantes como para determinar el costo generado debido a calefacción, encuentra una respuesta en los modelos térmicos de edificios.

Debido a la gran variedad de modelos generados, diferentes autores han identificado la necesidad de clasificarlos para mostrar de forma más clara los distintos métodos de trabajo empleados. Nelson Fumo (2014) realizó un trabajo bibliográfico del cual se desprende el siguiente esquema [3].

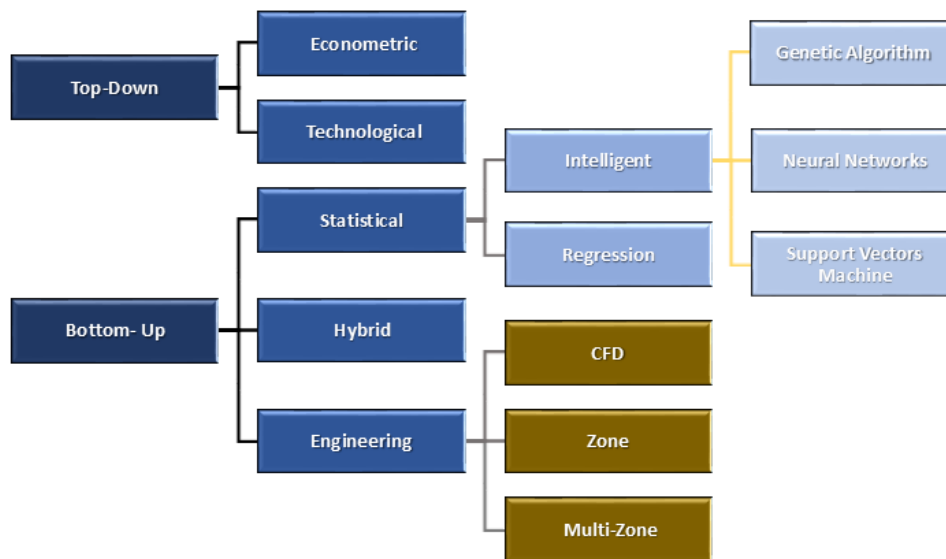


Figura 2.1: Clasificación para modelos de estimación. Elaboración propia basada en el modelo de Fumo (2014)

Fumo propone un esquema similar al de la figura 2.1 a partir de diferentes autores, dentro de los cuales se encuentra la investigación realizada Swan & Ismet (2009) utilizando una clasificación similar pero omitiendo la tipología Top-Down y enfocándose en Bottom-up, ambas categorías usadas para estimar el consumo en un edificio o en un sector residencial [4].

La primera tipología mencionada en el párrafo anterior, Top-Down, hace referencia a un enfoque en el cual se estima el consumo de un edificio a partir desde un conjunto de edificios o conjunto habitacional, haciendo este tipo de análisis a un nivel macro para considerar efectos a largo plazo en la red de transmisión. Este modelo considera el sector estudiado como un sumidero de energía y no el uso final que se le da a esta. Esta categoría se puede subdividir en dos tipos econométrico y tecnológico, estas últimas dos categorías se escapan de los objetivos de investigación.

En contraste con la categoría mencionada en el párrafo anterior se encuentra la metodología Bottom-up la cual, según Swan & Ismet, abarca todos los modelos que ocupan datos de entradas con un nivel jerárquico menor a un conjunto habitacional. La categoría anteriormente mencionada no solo tiene como por objetivo obtener el consumo de alguna edificación, sino que también el uso final que se le da a esta energía.

En el esquema 2.1, que representa la categorización realizada, se pueden diferenciar tres principales agrupaciones dentro del enfoque Bottom-Up: Estadístico, Híbrido e Ingenieril.

Con la finalidad de comprender el estado actual de las metodologías empleadas para crear modelos a continuación se procede a realizar un breve descripción cada categoría:

2.1.1. Método estadístico

De forma similar al planteamiento de Peedersen (2007), en esta categoría se incluyen aquellos modelos que utilizan análisis usando regresiones tanto lineales, como multivariantes de data de largo plazo del consumo energético usando correlaciones matemáticas con factores como la carga térmica y/o la temperatura ambiental [5]. Además se añade a esta categoría aquellos modelos “Intelligent”, sistemas desarrollados en algoritmos basados en “Machine learning” capaces de realizar tareas de control en un sistema a partir de interpretación de datos.

La categoría ‘Intelligent’ se divide en tres grupos dentro de los cuales se encuentran Genetic algorithm, Neural Networks y Support Vectors Machine.

Genetic algorithm

El principio utilizado en este tipo de algoritmos está basado en la facultad de las especies de adaptarse al medio ambiente y sobrevivir a condiciones extremas. En simulaciones este tipo de algoritmo es usado para encontrar un modelo de predicción, el objetivo de esto es deducir una ecuación capaz de ajustarse al problema, esta puede ser lineal cuadrática o exponencial, donde los coeficientes que aproximan la función son obtenidos con los algoritmos genéticos [6].

Neural Networks

Estos algoritmos son entrenados con un conjunto de datos con la finalidad de que este pueda realizar predicciones y crear en nuevos patrones [7]. El fundamento tras este enfoque es imitar y mejorar el método de aprendizaje humano utilizando un algoritmo entrenado.

Support Vectors Machine (SVM)

Este tipo de inteligencia artificial es usualmente utilizada para resolver problemas de clasificación y regresiones. La clasificación permite separar un a serie de datos en diferentes categorías cuyas características están dadas por el usuario. La regresión de

datos permite describir un conjunto de datos por una ecuación específica, este última es el foco utilizado en los modelos de consumo energético.

El modelo mencionado en el párrafo anterior se basa en la optimización del de la regresión para favorecer a la dispersión. SVM utiliza un par de datos de entrenamiento para superar la no linealidad del problema y lograr un modelo lineal que relacione las variables de entrenamiento. Esto se hace enviando el problem no-lineal a un espacio de mayor dimensión, llamado el espacio de las funciones. Para mejor entendimiento de esta metodología el lector puede revisar la referencia [6].

2.1.2. Método ingenieril

Como plantea Zhao(2012), el método ingenieril utiliza principios físicos para calcular el comportamiento termodinámico y energético de todo un edificio o componenets en sub niveles [8]. Fumo plantea dos sub-categorías en esta clasificación: Forward y calibrated, las cuales se diferencian en el uso de datos para la validación del modelo como se explica a continuación.

La categoría Forward refiere a métodos que no utilizan datos para su validación sino que utilizan una herramienta o método de verificación de estado, el software tiene que ser acreditado por RESNET (Residential Energy Services Network) y debe satisfacer los criterios y procedimiento de verificaciones acreditados por Home Energy Rating System (HERS) Software Tools [9]. Por otro lado, se tiene la categoría calibrated la cual es validada por datos experimentales.

2.1.3. Método híbrido

Este método, tal como su nombre lo indica mezcla ambas metodologías antes mencionadas, un modelo físico para representar el edificio o aire acondicionado y un modelo estadístico para obtenerlas variables claves a través de un análisis estadístico [10].

2.2. Desarrollo modelos térmicos en edificios

El enfoque de esta memoria es la utilización del método ingenieril para el desarrollo de un modelo térmico del edificio “E1” del departamento de Ingeniería eléctrica de la Universidad Federico Santa María Campus San Joaquín. Este método describe las necesidades de un sistema en específico dependiendo de la utilización del espacio, variables ambientales y desempeño de los equipo de calefacción, entre otras variables. Como se

mencionó anteriormente estos programas utilizan modelos termodinámicos para aproximar el comportamiento de las variables de interés con cierta frecuencia temporal.

Para que el lector tenga una comprensión más amplia de los tipos de modelos que se presentan en esta categoría, se procede a explicar los distintos modelos presentes en la literatura.

2.2.1. Método CFD

El método llamado dinámica de fluidos computacionales o por sus siglas en inglés (CFD) es descrito por Zikanov (2010) quien indica como modelo es un conjunto de métodos aplicados para obtener una solución aproximada a problemas de dinámicas de fluidos y transferencia de calor [11]. La manera en la cual se trabaja con la metodología CFD en edificios es discretizando las distintas zonas de un edificios para modelar el comportamiento termodinámico en una gran cantidad de volúmenes de control que representan el interior de este, en los cuales se resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes. Existe una gran variedad de programas comerciales utilizados que usan esta metodología entre los cuales se encuentran COMSOL Multiphysics [12], FLUENT [13], CFD-ACE [14], TECPLOT [15], entre otros.

Una de las principales desventajas del uso de la metodología CFD es el gran costo computacional que tiene [16], dado que es necesario realizar el mallado de pequeño tamaño en los bordes para estudios de transferencia de calor y masa en los bordes, por lo que usualmente se utiliza para modelar sub-sistemas como HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) en vez de todo el edificio y se utilizan modelos híbridos mezclando esta metodología con un enfoque estadístico o con otro método ingenieril para dar solución con menor costo computacional y la precisión deseada.

2.2.2. Método zonal

El autor Megri (2007) define el método zonal como la división de la habitación en diferentes zonas. Esta metodología es un enfoque intermedio entre los enfoques CFD y Multizona o nodal que se describe posteriormente. Este modelo utiliza parámetros físicos de una de cada habitación, este método da una herramienta que puede ser utilizada para la investigación de confort térmico, calidad del aire y análisis energético.

Los modelos zonales son capaces de predecir presión, temperatura, flujo de masas basadas en sus formas integrales. A través de las leyes de conservación y diferentes

modos de transporte térmico el modelo es capaz de interpretar estos fenómenos generalmente a partir de las siguientes ecuaciones [17].

$$\sum_j \dot{m}_{j \rightarrow i} = 0 \quad (2.1)$$

$$\sum_j \phi_{j \rightarrow i} + \phi_{source} = \rho_i V_i C_p \frac{\partial T_i}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$P_i = \rho_i R T_i \quad (2.3)$$

$$\dot{m}_{j \rightarrow i} = \rho_{j,i} A \cdot C_d (P_j - P_i)^n \quad (2.4)$$

$$\phi_{j \rightarrow i} = c_p (\dot{m}_{j \rightarrow i}^+ T_j + \dot{m}_{j \rightarrow i}^- T_i) + \frac{\lambda_{air} A}{l} (T_j - T_i) \quad (2.5)$$

La ecuación 2.1 hace referencia a la conservación de la masa asumiendo fluido incompresible, ecuación 2.2 conservación de la energía, la ecuación 2.3 hace referencia a ley de los gases ideales, la ecuación 2.4 representa el flujo másico asumiendo diferencia de presión entre las caras verticales de cada zona y la ecuación 2.5 intercambio global de calor entre las caras. Donde $\dot{m}$ es el flujo másico, ϕ es flujo de calor, P es presión, ρ es la densidad, C_d es el coeficiente de descarga de flujo, A es el área de la interfaz de la zona, V es el volumen del nodo, R , c_p y λ_{air} son la constante del gas, calor específico y la conductividad térmica del aire.

En este metodo asume en cada zona una condición homogénea, cada habitación es dividida en distintas zonas a diferencia del metodo nodal, lo cual permite realizar estudios más detallados, como por ejemplo estudio de estratificación térmica o concentración de contaminantes. Para el funcionamiento de esta metodología zonal se necesita información adicional para definir los distintos flujos presentes en el modelo físico para lo cual usualmente se utiliza un modelo CFD en estado estacionario para alimentar las condiciones iniciales o de borde. Un procedimiento común para validar este tipo de modelos es comparar los resultados obtenidos con modelos CFD o datos reales [18]. Como plantea Song (2008) [19] un asunto importante en la metodología es dividir las zonas de manera apropiada, esto puede ser hecho experimentalmente, aunque requiere esfuerzo y tiempo, lo que hacen muy costosos este tipo de modelo, por lo que el desarrollo de la creación de zonas también es un área de estudio de gran atención.

La metodología zonal ha sido utilizada durante varias años, donde se destacan es-

tudio de estratificación térmica de autores como Voeltzel (1999) [20] ; Gao (2006) [21] , modelos de contaminante y su distribución por Huang and Haghighat (2005) [22], modelos para resolver problemas diseños indoor y outdoor Bozonnet (2005) [23], aplicaciones de modelos en sistemas solares en agua caliente para uso domestico como fue estudiado por Kenjo et al. (2007) [24]. Además se plantean mejoras en los algoritmos, consideraciones en la resolución de las ecuaciones de conservación de momento y conservación de masa para aumentar la precisión de ciertos parámetros como los coeficientes de transferencia de calor y coeficientes de flujo, como plantea el autor Megri(2015) [25], aplicaciones en sistemas híbridos, tales como un modelo de análisis y control para un centro de datos utilizando el método zonal y artificial Neural Network [26].

2.2.3. Método multizona o nodal

El método multizona o nodal considera cada zona con características homogéneas, cada zona es aproximada a un nodo que es descrito por una temperatura, presión, concentración, etc. Estos nodos generalmente representa una habitación o una pared. Estos modelos puede llegar a ser más específicos incluyendo variables como cargas (uso de las habitaciones, ganancia debido a los equipos, sistemas de aire acondicionado,etc.)[6].

Las ecuaciones de transferencia de calor son resueltas para cada nodo, por lo cual es considerado un enfoque de una dimensión. Trnsys [27] , EnergyPlus [28], ESP-r [29], COMIS [30] son ejemplos de programas comerciales altamente utilizados en investigación. Los procedimientos utilizados por estos modelos para la resolución de ecuaciones de transferencia de calor debido a conducción se basa principalmente en un análisis por analogía eléctrica como explica Boyer(1996)[31] y funciones de transferencia siendo este último el más utilizado.

Diferencias finitas

Los modelos que utilizan la analogía termo-eléctrica discretizan los elementos físicos en nodos como se muestra en la figura 2.2 y luego se relacionan las variables térmicas con su equivalente eléctrico, temperatura como un análogo del voltaje, flujo de calor como corriente eléctrica, resistencia térmica como resistencia eléctrica y en cada nodo se añade un condensador el cual hace referencia a la capacidad térmica de almacenamiento de este. Dicho, modelo queda representado en la figura 2.3.

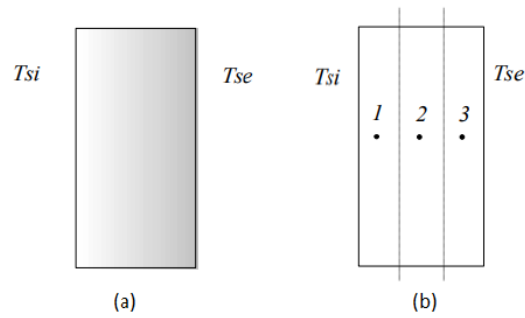


Figura 2.2: Representación física de un muro (a), Discretización de un muro (b) obtenido del autor Boyer (1996)

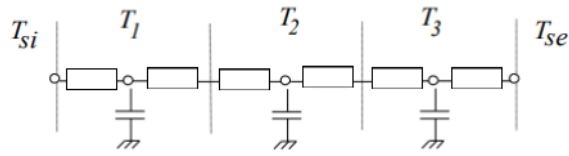


Figura 2.3: Analogía eléctrica de la figura 2.2 obtenido del autor Boyer (1996)

Bajo esta analogía se procede a incluir a las condiciones de borde como lo son la densidad de flujo de onda larga y onda corta formando así un sistema lineal con algunas simplificaciones de linealización como lo son la temperatura media radiante y temperatura de cielo. Luego se utiliza un esquema de diferencias finitas para la resolución de las variables deseadas.

Funciones de transferencia

Las funciones de transferencia buscan dar respuesta al comportamiento termodinámico de un elemento, como por ejemplo un muro o un vidrio a través de un modelo de caja negra como se muestra en la figura 2.4. El principio detrás de esta metodología es “El flujo causado por cualquier variación de temperatura arbitraria puede ser determinado si se conoce el flujo resultante de un cambio de paso unitario” [32] Mitalas and Stephenson(1981). Mitalas realizó un modelo aproximándose a la temperatura por medio de pulsos triangulares, el enfoque consiste en tomar la transformada de Laplace de la ecuación de conducción de calor y las condiciones de contorno para resolver la ecuación en el dominio de Laplace. Después de multiplicar la función de transferencia por la Transformada de Laplace del pulso de temperatura triangular, el inverso de la transformada se calcula mediante la resolución numérica de las raíces de la ecuación característica y suma de los residuos en cada uno de estos polos [33].

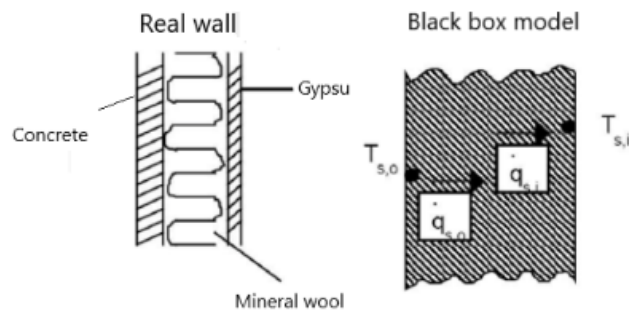


Figura 2.4: Modelo de funciones de transferencia. Manual Trnsys 17.

Funciones de transferencia en conducción (CTF) son utilizadas en los modelos de cálculo de cargas térmicas o análisis energético para el cálculo del flujo de calor debido a este tipo de transferencia de calor, siendo una herramienta versátil capaz de adaptarse a diferentes tipologías de cálculo energético. Existe un método ampliamente utilizado denominado Z-Transfer function, además el autor Li (2009) destaca dos métodos populares Direct Root-Finding (DRF), State-space (SS) para calcular los coeficientes CTF [34].

Para una mayor comprensión de estos métodos se procede a explicar de acuerdo a el trabajo bibliográfico realizado por Li (2009). Las simulaciones de edificios se realizan usando un modelado en una dimensión, con propiedades de materiales constantes. Usualmente es necesario resolver la ecuación simplificada de difusión de calor ecuación 2.6 la cual es una ecuación diferencia parcial donde a_m es la difusividad térmica, $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$ es la segunda derivada parcial de la temperatura con respecto al espesor de la pared y $\frac{\partial T(x,\tau)}{\partial \tau}$ es la derivada parcial de la temperatura con respecto al tiempo, que es resuelta

con el método CFT y la ley de Fourier, ecuación 2.7, la cual especifica el flujo de calor por convección en términos de la conductividad térmica K y el gradiente de temperaturas a través del espesor de la pared $\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x}$.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{a_m} \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} \quad (2.6)$$

$$q = -k \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \quad (2.7)$$

El planteamiento de este método involucra tres grupos de coeficientes X , Z e Y los cuales representan términos exteriores, interiores y cruzados respectivamente. La ecuación 2.8 muestra los términos iniciales exterior y cruzados que influyen en la temperatura superficial del tiempo de evaluación actual. Q_0 es el termino flujo exterior histórico mostrado en la ecuación 2.9 .

$$q_{o, \theta} = -Y_0 T_{is, \theta} + Q_0 \quad (2.8)$$

$$Q_o = \sum_{k=1}^{N_y} Y_K T_{is, \theta - K\delta} + \sum_{k=1}^{N_x} T_K T_{os, \theta - K\delta} + \sum_{k=1}^{N_\varphi} \varphi_K q_{0, \theta - K\delta} \quad (2.9)$$

$$q_{i, \theta} = -Z_o T_{is, \theta} + Y_o T_{os, \theta} + Q_i \quad (2.10)$$

$$Q_i = -\sum_{k=1}^{N_z} Z_K T_{is, \theta - K\delta} + \sum_{k=1}^{N_y} Y_K T_{os, \theta - K\delta} + \sum_{k=1}^{N_\varphi} \varphi_K q_{i, \theta - K\delta} \quad (2.11)$$

Las ecuaciones 2.10 y 2.11 representan el flujo al interior de la superficie. Donde q_o y q_i representan el flujo al exterior y al interior de la superficie respectivamente. X_k , Y_k y Z_k son las CFT anteriormente mencionados. T_{is} y T_{os} temperatura exterior e interior de la superficie. N es la cantidad de términos CFT, φ_k es el coeficiente de flujo y N_k en número de términos de flujo histórico. θ representa el tiempo actual y δ es el salto de tiempo.

Las ecuaciones 2.8, 2.9, 2.10 y 2.11 relacionan los flujos históricos, vale decir de pasos de tiempo anteriores con los actuales. Las ecuaciones anteriormente mencionadas se resuelven mediante iteración y la convergencia depende de la capacitancia de los materiales de construcción, para materiales livianos son necesarios pocos términos en cambio para materiales pesados es precisado una mayor cantidad de términos.

- Z-Transfer function method

Este método es usado por diversos programas de simulación térmica de edificios y es el utilizado en este trabajo de título por Trnsys. A continuación se presenta una breve descripción del método función de transferencia Z el cual es completamente descrito en por el autor William O'Brien (2015) en libro Modeling, Design, and Optimization of Net-Zero Energy Buildings [35].

El método calcula la transferencia de calor por conducción unidimensional a través de paredes y/o techos. Mitalas[36] describe la transferencia de calor como una función de transferencia $G(z)$ la cual es el razón entre la transformada Z (ZT) de la salida $O(z)$ y la ZT de la entrada $I(z)$. $I(z)$ es directamente calculado por la transformada de Laplace (LT) mientras que para $O(z)$ Mitalas usa la respuesta temporal obtenida a través de la ecuación diferencial del muro resuelto a través de LT. Se utilizaron entradas del tipo rampa lineal de temperatura para obtener los valores capaces de describir el sistema. Para solucionar el problema de forma exacta es necesario una suma infinita de términos, pero el comportamiento de las paredes puede ser descrito con un menor número de coeficientes dado que estos van disminuyendo en magnitud a medida que aumenta la cantidad de términos. El procedimiento usualmente utilizado es cuantificar la influencia de el último término agregado a la serie.

$$G(z) = \frac{Z[y(t)]}{Z[u(t)]} = \frac{num(z)}{den(z)} = \frac{n_0 + n_1 z^{-1} + n_2 z^{-2} \dots + n_R z^{-R}}{d_0 + d_1 z^{-1} + d_2 z^{-2} \dots + n_R z^{-M}} \quad (2.12)$$

Donde $n(z)$ y $den(z)$ son polinomios, donde z se define como:

$$z = e^{st}$$

Se puede describir la transmisión de calor transiente a través de una pared multicapa utilizada en la ecuación 2.13 .

$$q_i = \frac{1}{B(z)} T_o(z) - \frac{A(z)}{B(z)} T_i(z) \quad (2.13)$$

Las variables truncadas en el término N-ésimo se describen la siguiente manera.

$$\frac{1}{B(z)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_n z^{-n}}{d_0 + d_1 z^{-1} + d_2 z^{-2} + \dots + d_n z^{-n}}$$

$$\frac{A(z)}{B(z)} = \frac{c_0 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + \dots + c_n z^{-n}}{d_0 + d_1 z^{-1} + d_2 z^{-2} + \dots + d_n z^{-n}}$$

$$q_i(z) = q_{i,0} + q_{i,1} z^{-1} + q_{i,2} z^{-2} + \dots + q_{i,n} z^{-n}$$

$$T_i(z) = T_{i,0} + T_{i,1} z^{-1} + T_{i,2} z^{-2} + \dots + T_{i,n} z^{-n}$$

$$T_o(z) = T_{o,0} + T_{o,1} z^{-1} + T_{o,2} z^{-2} + \dots + T_{o,n} z^{-n}$$

Donde $d_0 = 1$

■ Direct Root-Finding (DRF)

El autor Hittle [33] plantea el método DRF como un sistema de ecuaciones en el dominio de Laplace (ecuación 2.14) donde $A(s)$, $B(s)$ and $D(s)$ son el conjunto de matrices de transmisión que dependen de las propiedades de los materiales y los coeficientes de película del aire. Los factores de repuesta generados aplicando un pulso triangular de temperatura dentro y fuera de las superficies del muro. Los factores son definidos como los flujos de calor discretizados en cada superficie.

$$\begin{bmatrix} q_i(s) \\ q_o(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{D(s)}{B(s)} & -\frac{1}{B(s)} \\ \frac{1}{B(s)} & \frac{A(s)}{B(s)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i(s) \\ T_o(s) \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Los factores son una serie infinita, pero Hittle plantea un método de truncamiento en la ecuación que introduce coeficientes de flujo histórico en la ecuación 2.15 donde U es el coeficiente global de transferencia de calor.

$$\sum_{k=0}^{N_x} X_k = \sum_{k=0}^{N_Y} Y_k = \sum_{k=0}^{N_z} Z_k = U \left(1 - \sum_{k=0}^{N_\varphi} \varphi \right) \quad (2.15)$$

■ State-Space (SS)

En el trabajo bibliográfico de Li (2009) se plantea que el método state-space (SS) el cual se utiliza para analizar sistemas lineales con gran cantidad de inputs y outputs, los problemas de tranferencia de calor han sido formulados en SS utilizando diferencias finitas o elementos finitos [37].

$$\begin{bmatrix} \frac{dT_1}{dt} \\ \frac{dT_2}{dt} \\ \vdots \\ \frac{dT_n}{dt} \end{bmatrix} = a \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_n \end{bmatrix} + b \begin{bmatrix} T_i \\ T_o \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$\begin{bmatrix} q_i \\ q_o \end{bmatrix} = c \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_n \end{bmatrix} + d \begin{bmatrix} T_i \\ T_o \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Las ecuaciones 2.16 y 2.17 relacionan las temperaturas de superficies con los flujos interiores y exteriores en cada superficie para cada nodo. Donde $T_1, T_2, \dots, T_n$ es la temperatura de cada nodo. a, b, c, d son matrices de coeficientes que dependen de las propiedades del material y coeficientes de la película de aire. Las matrices de coeficientes a, b, c, d se pueden calcular numéricamente. Y luego los CTF pueden ser obtenidos por el algoritmo Leverrier [38] de las matrices de coeficientes a, b, c, d .

Para cada zona se procede a explicar el análisis termodinámico aplicado. Existen dos enfoques principales los cuales se diferencian en el modelado de la transferencias de calor debido a convección y radiación dentro de la habitación.

1. Coeficientes combinados convección-radiación: También llamados coeficientes de película, en modelo la red termodinámica se estructura como se muestra en la figura 2.5 la cual se denomina Star-network. En modelos con altas ganancias solares o calefacción por radiación puede generar errores de alta magnitud.

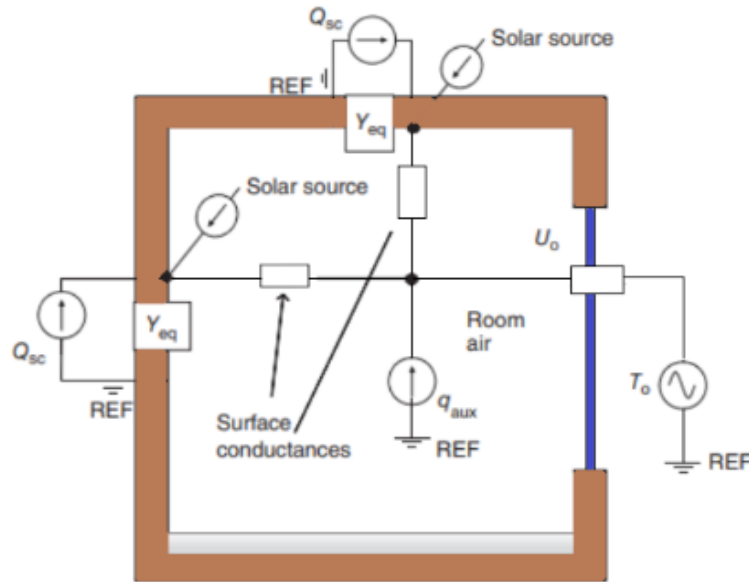


Figura 2.5: Esquema de una zona (calefaccionado por convección) con un modelo de Star-network y circuito equivalente Norton para las paredes. Ali Saberi Derakhtenjani en William O'Brien (2015)

Para comprender el circuito anterior hay que notar que en las paredes se utiliza un circuito equivalente de Norton, el cual es el modelo CFT descrito anteriormente, la figura 2.7 muestra de manera gráfica como se realiza la analogía.

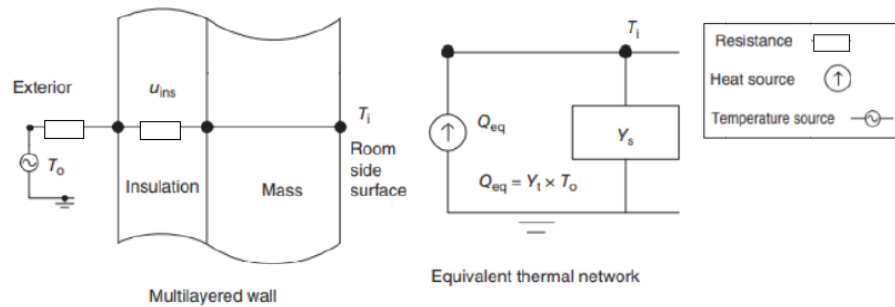


Figura 2.6: Esquema de un muro multicapa y su circuito equivalente Norton. Ali Saberi Derakhtenjani en William O'Brien (2015)

2. Modelo de intercambio convectivo-radiactivo separado en el interior de la habitación: Las masas térmicas de las paredes son modelados mediante un elemento distribuido por dos puertos. El aire de la sala y las construcción liviana se puede modelar como una capacitancia térmica la cual no influye de gran manera en el cálculo de la carga térmica, pero es importante de incorporar en los estudios de control dada su alta frecuencia de respuesta [35] .

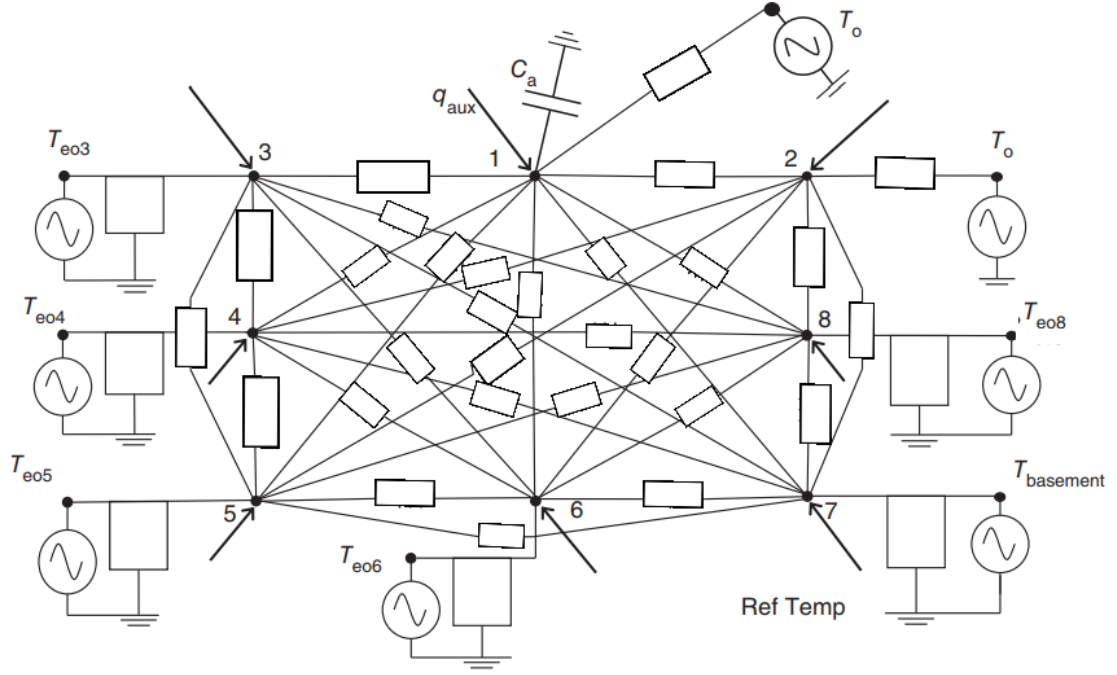


Figura 2.7: Esquema de circuito con modelo de intercambio radiativo-conductivo por separado. Figura extraída de Ali Saberi Derakhtenjani en William O'Brien (2015)

Luego las resistencias conectadas con el nodo 1, es decir, el aire de la habitación con las superficies interiores (nodos j) representan la conductancia (h_{cj}) la cual esta dada por:

$$U_{ij} = A_j h_{cj}$$

Por otro lado las conductancias radiactivas interconectadas desde las superficies interiores (nodos 2-8):

$$U_{ij} = A_i \sigma 4 T_m^3 F_{ij}^*$$

Donde T_m es la temperatura media, F_{ij}^* son los factores de intercambio radiativo entre los pares de superficies determinado por los factores de visión f_{ij} .

$$F_{ij}^* = m_{ij} \epsilon_i \epsilon_j / \rho_i$$

Donde $m = M^{-1}$ y la matriz m esta dada por $m_{ij} = I_{ij} - \rho_i F_{ij}$ donde I_{ij} es la matriz identidad.

Para la resolución de los balances de energía se utiliza el equivalente Norton de cada muro usando Q_{sc} y Y_{eq} .

La capacidad del aire para almacenar energía queda representado por $q(s) = s \cdot C_a$ en el dominio de Laplace, donde el balance energético esta dado por:

$$Y_{NxN}T_N = Q_N$$

Siendo Y la matriz de admitancia, T el vector de temperaturas y Q el vector fuente. Para entender de mejor manera la metodología empleada el autor recomienda consultar William O'Brien (2015) [35] quien brinda la explicación de cómo se obtiene la matriz Y y los circuitos equivalentes Norton anteriormente mencionados.

Capítulo 3

Metodología de medición

Este capítulo tiene por objetivo mostrar el protocolo de medición de datos para validar un modelo térmico de un edificio, además de establecer los parámetros relevantes para medir las condiciones de confort térmico en un edificio.

3.1. Parámetros de interés

El confort térmico es un tópico ampliamente estudiado, el modelo utilizado para este estudio es un modelo tradicional basado en un balance estacionario de calor y masa, el modelo PMV-PPD desarrollado a partir de este enfoque sienta las bases del estándar internacional ISO 7730 (2005), el cual considera al sujeto como un receptor pasivo.

Los parámetros que este modelo toma en cuenta son:

- Temperatura del aire
- Temperatura de pared
- Humedad relativa
- Velocidad del aire
- Tasa metabólica y nivel de vestimenta
- Gradientes verticales de temperatura asimetría de la temperatura radiante

Por otro lado este modelo también puede integrar variables atmosféricas con el fin de implementar la transferencia de calor del ambiente así como variables necesarias para evaluar la integración de generación eléctrica por paneles fotovoltaicos u otra fuente de generación eléctrica.

Parámetros de medición exterior:

- Temperatura ambiental
- Humedad relativa
- Radiación global horizontal (GHI)
- Velocidad del viento

Otros parámetros de medición.

- Uso de la habitación estudiada.
- Consumo eléctrico de la habitación estudiada

3.2. Equipos de medida y registro de datos

- Lugar de estudio

Para realizar el estudio se escogió el edificio del Departamento de Ingeniería Eléctrica (DIE) situado en las coordenadas $33^{\circ}29'24,5'' S$ $70^{\circ}37'13,4'' W$ comuna de San Joaquín, Región Metropolitana, Santiago de Chile, como se muestra en la figura 3.1



Figura 3.1: Ubicación del edificio.

A continuación se muestra la representación del edificio en el programa TRNSYS 3.2 a y en la figura 3.2 b se representa la habitación estudiada.



Figura 3.2: Edificio del DIE , modelo TRNSYS (a), Laboratorio memoristas (b).

3.3. Medición en la habitación

- Temperatura de aire y humedad relativa en la habitación

Los puntos de medición en la habitación se disponen como se representa en la figura 3.3, donde los puntos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 son sensores PT-100 (ficha técnica en A.1) los cuales están conectados a un transmisor de señal que posteriormente se conecta a una tarjeta de adquisición de datos que es configurada en el programa LabView. Los datos son guardados minuto a minuto.

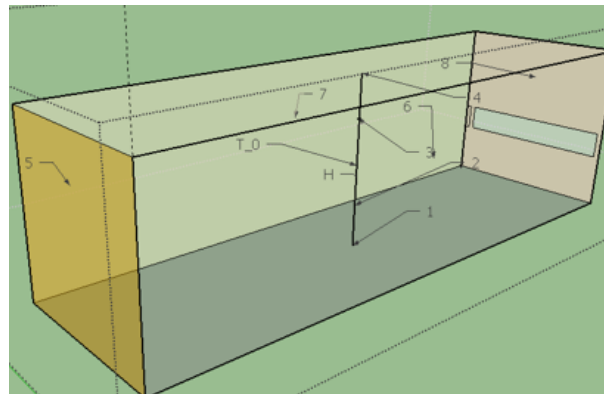


Figura 3.3: Puntos de medición con TRNSYS

Los puntos T_o y H corresponden a un sensor de temperatura y de humedad relativa (ficha técnica en A.2) donde la adquisición de datos se realiza de manera análoga a la anterior.

En la figura 3.4 se muestra el montaje de medición de temperatura de pared, estas mediciones se realizan aplicando pasta termo-conductora en un punto de la pared sobre la cual se coloca el sensor de temperatura y este a su vez está recubierto con una cinta aislante térmica (ver apéndice). Además para la medición de humedad relativa y la estratificación térmica se realiza el montaje de una barra de aluminio donde se posicionaron sensores de temperatura a distintas alturas como

se evidencia en figura 3.5.

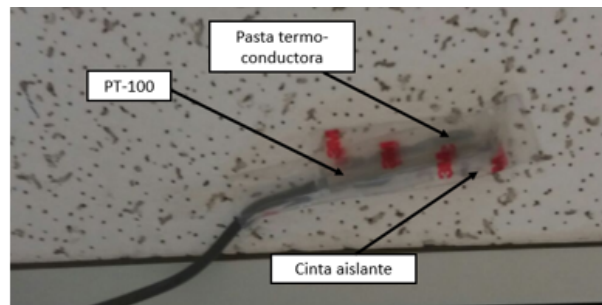


Figura 3.4: Medición de temperatura de pared.



Figura 3.5: Montaje medición estratificación térmica en la habitación.

3.4. Medición exterior

- Temperatura de aire y humedad relativa.

Las mediciones de temperatura ambiente y humedad relativa se realizan con dos sensores de humedad relativa (ficha técnica en A.3) y dos sensores de temperatura, un sensor de temperatura ambiente y un sensor PT-100 (ficha técnica en A.4). Los intervalos de medición son cada minuto.

- Radiación global horizontal (GHI)

Los instrumentos que se utilizaron para medir radiación global horizontal fueron dos piranómetros (Kipp & Zonen) mostrados en la Figura 3.6. Es importante notar que es necesario verificar la calibración del modelo CM3 y luego realizar, si fuera necesario un ajuste de la curva del piranómetro CM3 a con el modelo CM10. Este análisis fue realizado en Teiteman(2017) [39].

Estos instrumentos entregan una señal proporcional a una diferencia de voltaje, el cual se procesa con un factor de sensibilidad propio de cada modelo para así obtener la radiación global horizontal. Este factor de conversión corresponde a la sensibilidad del piranómetro ver tabla 3.1.

Tabla 3.1: Sensibilidad piranómetro.

	CM10	CM3
Sensibilidad [V/Wm^{-2}]	$4,36 \cdot 10^{-6}$	$20,45 \cdot 10^{-6}$
Error [W/m^2]	± 10	± 25

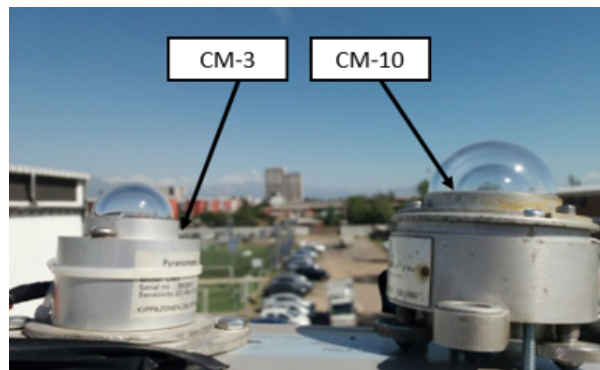


Figura 3.6: Piranómetros utilizados para medir radiación global horizontal.

- Amplificador de Señal

Para registrar las mediciones de voltaje de los piranómetros se utilizan data loggers, de rango 0 a 200 [mV] los cuales son presentados en el apéndice. Dada la baja señal entregada por los piranómetros, del orden de 4 y 20 [mV] para el CM10 y CM3 respectivamente con una radiación de 900 [W/m²], se implementa de un amplificador de señal (ver figura 3.7), ya que, de lo contrario los errores de medición podrían llegar a ser del orden del 25 % y 4 % para el CM10 y CM3.

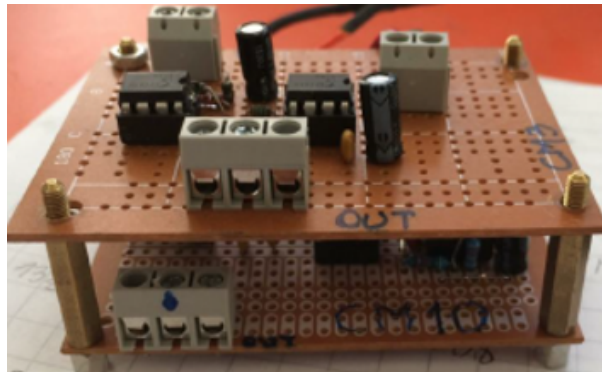


Figura 3.7: Amplificador de señal para voltaje.

3.5. Otros parámetros de medición

- Uso de la habitación estudiada

Para el modelo térmico es importante conocer el nivel de ocupación de la habitación, dadas las ganancias térmicas producidas por cada ocupante de la habitación y las infiltraciones por medio de su ingreso y salida de la habitación. Para medir este nivel de uso de la habitación se realizó un estudio del uso del lugar, donde se registró la hora de ingreso y salida de los ocupantes.

- Consumo eléctrico de la habitación estudiada y electricidad generada por los sistemas solares y eólico.

3.6. Tabla resumen error instrumental

Tabla 3.2: Tabla resumen error instrumental

Instrumento	Error instrumental
Piranómetros CM-3	$\pm 25 [W/m^2]$
Piranómetros CM-10	$\pm 10 [W/m^2]$
Sensor de humedad	$\pm 3 \%$
Sensor de Temperatura	$\pm 0,5 [^{\circ}C]$
PT 100 interiores	$\pm 0,5 [^{\circ}C]$
Datalogger Temperatura	$\pm 0,03 [^{\circ}C]$
Datalogger Humedad	$\pm 3 \%$

3.7. Protocolo de medición

Las mediciones se realizan durante un mes y medio en diferentes modalidades que fueron utilizados para validación del modelo térmico, las cuales se presentan a continuación.

3.7.1. Mediciones de la habitación sin sistema de climatización

Esta metodología de medición tiene por objetivo obtener las ganancias térmicas del modelo en base a las condiciones ambientales a las cuales se encuentra expuesto el edificio. En la figura 3.8 se evidencia la utilización del modelo. Los parámetros son medidos como se señala en las secciones anteriores.

- Fecha de inicio: 17/02/2018
- Fecha de término: 25/02/2018
- Duración: 9 días
- Inputs del modelo: Temperatura ambiente, humedad relativa, radiación solar.
- Outputs del modelo : Temperatura de la habitación, temperatura de pared.
- Consideraciones: Los equipos de aire acondicionado e iluminación se encuentran desconectados.

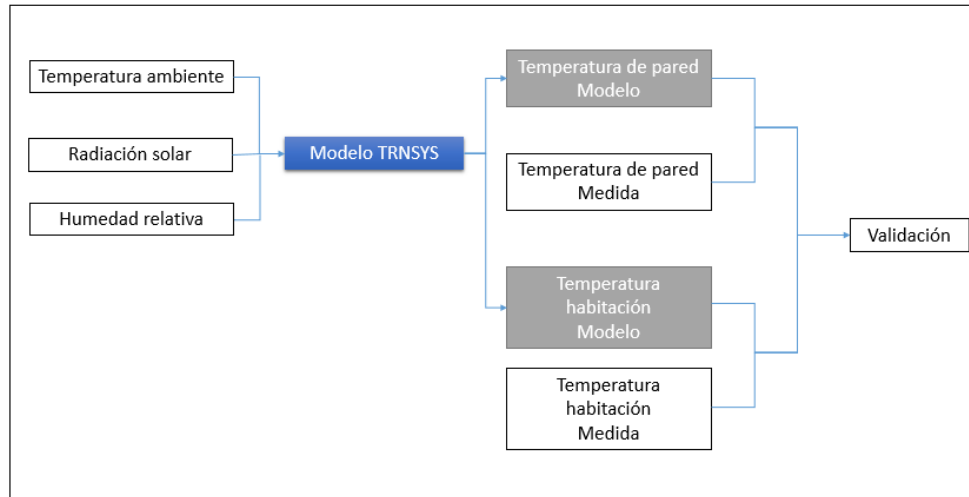


Figura 3.8: Diagrama de validación modelo sin sistema de refrigeración.

3.7.2. Mediciones de la habitación con sistema de climatización (Modo Aire Acondicionado)

Esta medición tiene por objetivo obtener las ganancias térmicas del modelo en base a las condiciones ambientales integrando un sistema de aire acondicionado, considerando las ganancias térmicas debido a un ocupantes y a los equipos utilizados. Se comparan los valores empíricos de las temperatura de pared y ambiente de manera análoga a la anterior. En la figura 3.9 se evidencia la utilización del modelo.

Tabla 3.3: Fecha realización mediciones

$T_{Control}$	Comienzo	Final
22[°C]	13/01/2018	19/01/2018
23[°C]	10/02/2018	15/02/2018
25[°C]	6/02/2018	8/02/2018

- Duración: 15 días
- Inputs del modelo: Temperatura ambiente, humedad relativa, radiación solar.
- Outputs del modelo: Temperatura de la habitación, temperatura de pared y carga térmica.
- Consideraciones: Ingreso de una persona a la habitación en horarios 10:00 - 18:00 y los consumos de sistema de climatización (Modo Aire Acondicionado) e iluminación se encuentran conectados. Se programa el aire acondicionado para mantener temperatura constante durante el tiempo de medición (ver tabla 3.3) se utilizan los valores 22[°C], 23[°C] y 25[°C]

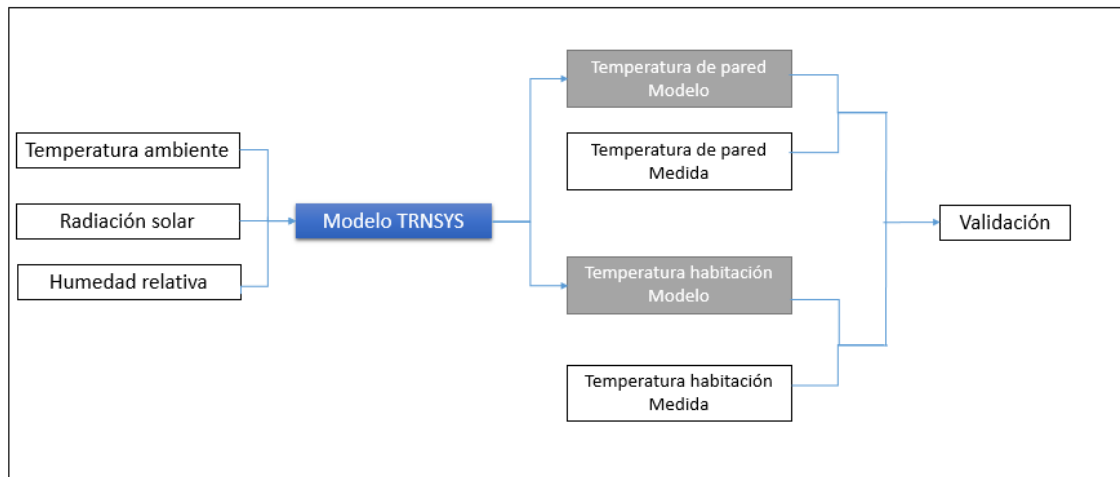


Figura 3.9: Diagrama de validación modelo con uso de la habitación de estudio y con sistema de refrigeración.

3.7.3. Mediciones de la habitación con sistema de climatización (Modo Bomba de Calor)

Esta medición tiene por objetivo obtener las ganancias térmicas del modelo en base a las condiciones ambientales integrando un sistema de calefacción. Se compara los valores empíricos de las temperatura de pared y ambiente de manera análoga a la anterior. En la figura 3.10 se evidencia la utilización del modelo.

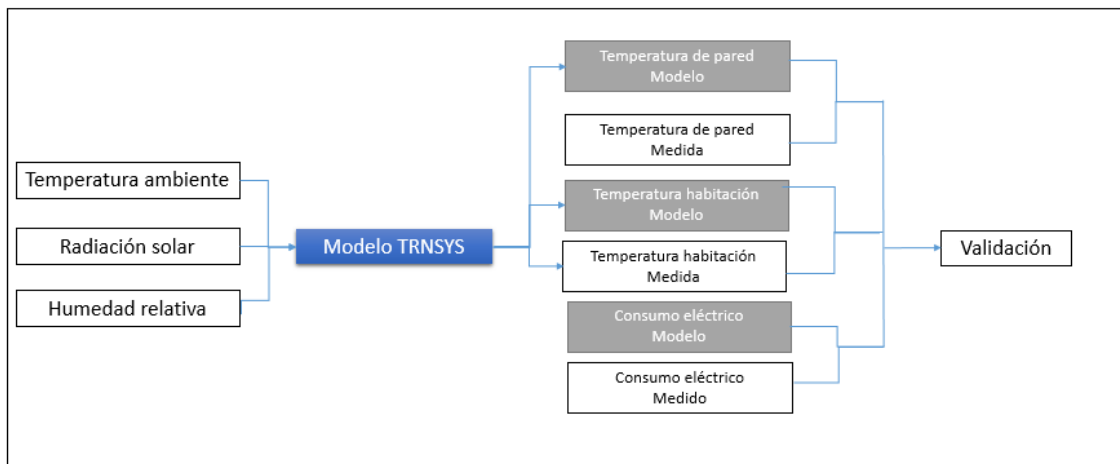


Figura 3.10: Diagrama de validación modelo con uso de la habitación de estudio y con sistema de bomba de calor con una temperatura de consigna de 23 [°C].

- Fecha de inicio: 28/06/2018
- Fecha de termino: 05/07/2018
- Duración: 7 días

- Inputs del modelo: Temperatura ambiente, humedad relativa, velocidad del viento, radiación solar.
- Outputs del modelo: Temperatura de la habitación, temperatura de pared y carga térmica.
- Consideraciones: Ingreso de una persona a la habitación en horarios 10:00 - 18:00 y los consumos de calefacción e iluminación se encuentran conectados. Se programa el aire acondicionado para mantener temperatura constante durante el tiempo de medición.

Capítulo 4

Descripción del modelo

4.1. Descripción física del modelo

Este capítulo tiene por objetivo dar al lector una noción de la distribución espacial del edificio. En la planta alta de la edificación (Figura B.1) se pueden distinguir cuatro zonas térmicas: sala de clases, laboratorio de memoristas (lugar donde se hacen las mediciones interiores), laboratorio de metrología y el pasillo. En la plata baja (Figura B.2) se distiguen dos zonas térmicas: el pañol y el laboratorio de maquinas eléctricas y accionamientos. Finalmente, en el subterráneo (Figura B.3) se diferencian cinco zonas térmicas: dos baños de alumnos, dos baños de funcionarios y un salón para de reuniones. La figura B.4 muestra la altura de cada zona y la composición de las paredes. Esta distribución física es replicada SketchUp con un plug-in llamado TRNSYS3d [40] en las zonas antes mencionadas y añadiendo algunos elementos significativos de sombreado como se muestra en la figura B.5.

4.2. Descripción modelo TRNSYS

Este capítulo tiene por objetivo explicar el modelo generado en el trabajo de título a través de la utilización de distintos componentes presentes en la librería del programa TRNSYS[27] y de elaboración propia, los cuales pretenden simular el comportamiento térmico de una habitación en el edificio de Ingeniería Eléctrica en la Universidad Federico Santa María Campus San Joaquín.

TRNSYS es un entorno de simulación flexible el cual permite la interacción de distintos componentes denominados como “Types” que simulan diferentes aspectos del comportamiento de equipos térmicos, eléctricos, estructurales, fenómenos físicos entre otros, con la finalidad de conseguir una respuesta transiente de los mismo con respecto a las variables de estudio. La descripción completa de cada componente están disponibles en el manual del programa TRNSYS 17 [27]. En el presente capítulo se hace énfasis en los modelos utilizados y en las consideraciones más relevantes para la configuración del modelo utilizado. TRNSYS Simulation Studio funciona como un ambiente interactivo del tipo caja negra, donde los componentes se relacionan entre sí con inputs y outputs. En la figura 4.1 se ilustra el modelo generado, el cual se procede a explicar a continuación:

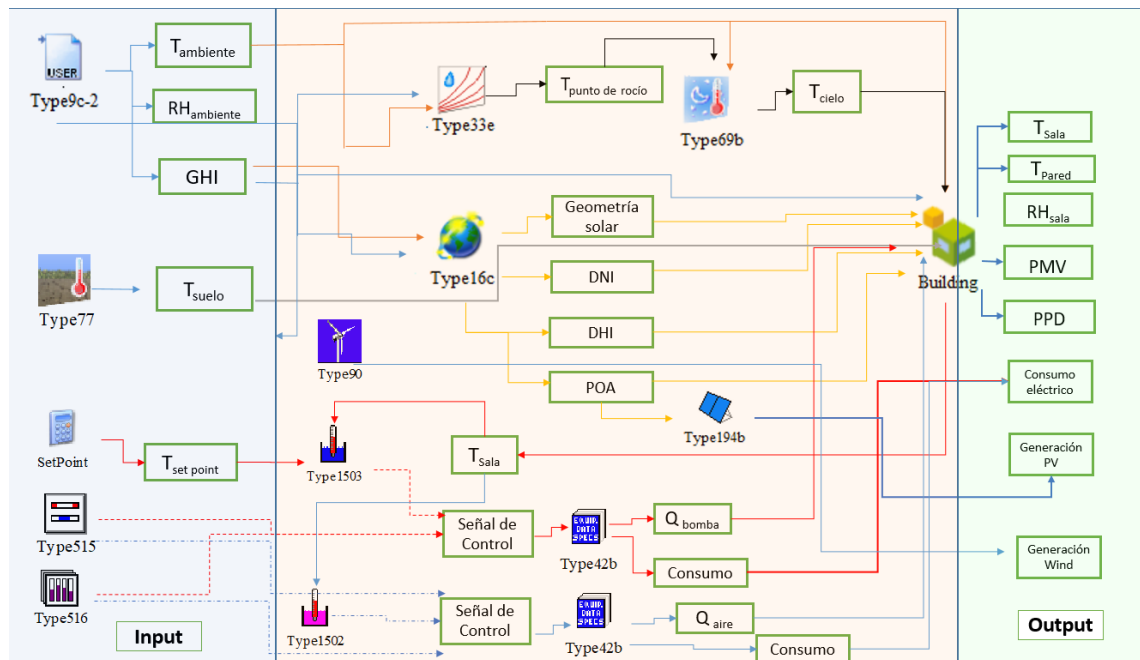


Figura 4.1: Diagrama de modelo térmico en Simulation Studio. Elaboración propia.

4.2.1. Parámetros ambientales

Los datos recolectados por medio del protocolo de medición mencionado en el capítulo 3.7 son leídos desde un archivo de texto por el Type 9c-2. Estos datos como se explicó anteriormente, son variables ambientales, temperatura ambiente medida en $[^{\circ}C]$, humedad relativa y radiación global horizontal (GHI) medida en $[W/m^2]$. Otros valores que son considerados como inputs en este modelo es la temperatura consigna, es decir la temperatura deseada en la habitación, la temperatura de suelo, la cual es generada por el Type 77, que utiliza el modelo entregado por Kasuda(1965)[41]; el valor ingresado para este componente es la temperatura ambiental media anual, la cual fue estimada por el autor como el promedio anual de la temperatura entregada en el TMY de Santiago de Chile, siendo esta $14,5[^{\circ}C]$, el modelo es descrito por la ecuación 4.1.

$$T_{Suelo} = T_{mean} - T_{amp} \cdot \exp\left[-depth \cdot \left(\frac{\pi}{365\alpha}\right)^{0,5}\right] \cdot \left(\frac{2\pi}{365}\right)[t_{now} - t_{shift} - \frac{depth}{2} \cdot \left(\frac{365}{\pi\alpha}\right)^{0,5}] \quad (4.1)$$

Donde T_{mean} es la temperatura media estimada como la temperatura de promedio anual del aire, T_{amp} es la temperatura ambiental máxima anual, Depth es la profundidad en metros, α es la difusividad térmica del suelo $[m^2/dia]$.

Posteriormente se utiliza el Type 16c, el cual tiene la función de procesador de radiación. Este último es capaz de realizar una interpolación de la radiación solar para intervalos menores a una hora, esto se realiza utilizando la trayectoria del sol, además, es posible estimar la radiación en una superficie fija o móvil. Para el modelo térmico del edificio es necesario obtener la diferenciación entre radiación directa y difusa en distintas orientaciones e inclinaciones para lo cual este componente provee distintos modelos dependiendo de la disponibilidad de datos y la diferenciación entre los tipos de radiación.

El modelo utilizado para la radiación horizontal en este componente corresponde al modelo 2 el cual fue planteado por Reindl (1990), [42], quien relaciona la fracción difusa (I/I_d) como función del índice de claridad, ángulo altitud solar y humedad relativa las cuales están dadas por las ecuaciones 4.2, 4.3 y 4.4.

Intervalo: $0 \leq kT \leq 0.3$; Restricción: $I_d/I \leq 1.0$

$$Id/I = 1,000 - 0,232kT + 0,0239 \sin(\alpha) - 0,000682T_a + 0,0195(rh/100) \quad (4.2)$$

Intervalo: $0.3 < kT < 0.78$ Restricción: $0.1 \leq I_d/I \leq 0.97$

$$Id/I = 1,329 - 1,716kT + 0,267 \sin(\alpha) - 0,00357T_a + 0,106(rh/100) \quad (4.3)$$

Intervalo: $0.78 < kT$; Restricción: $0.1 \leq Id/I$

$$Id/I = 0,426kT - 0,256\sin(\alpha) + 0,00349T_a + 0,0734(rh/100) \quad (4.4)$$

La radiación directa se obtiene en un plano horizontal como se plantea en la ecuación

$$I_b = I - I_d \quad (4.5)$$

Donde kt es la razón entre la radiación total sobre la superficie y la radiación extra-terrestre, α es el ángulo de altitud solar, T_a es temperatura ambiente y rh es la humedad relativa ambiental.

Por otro lado, la posición del sol en el cielo está dada por geometría solar relativa a la ubicación y la orientación de edificio, valores dados por el ángulo solar planteadas en Duffie(2013) [43] en las ecuaciones 4.6 y 4.7.

$$\cos(\theta_z) = \sin(\delta) \sin(\phi) + \cos(\phi) \cos(\delta) \cos(\omega) \quad (4.6)$$

$$\sin(\gamma_s) = \frac{\cos(\delta) \sin(\omega)}{\sin(\theta_z)} \quad (4.7)$$

Donde δ es el ángulo de declinación del sol, θ ángulo de incidencia del rayo de radiación en la superficie, ϕ latitud, ω ángulo de hora solar, θ_z ángulo de zenit solar, γ_s azimut solar.

La radiación en superficie inclinada es calculada usando la misma técnica de proyección en todos los modelos solo se diferencian en la estimación de la radiación difusa en la superficie inclinada. El cálculo de la contribución de la radiación directa en la superficie inclinada es calculada utilizando las ecuaciones 4.8, 4.9 y 4.10.

$$R_b = \frac{\cos(\theta)}{\cos \theta_z} \quad (4.8)$$

En la cual

$$\cos \theta = \cos \theta_z \cos \beta + \sin \theta_z \cos(\gamma_s - \gamma) \sin \beta \quad (4.9)$$

En la cual β es la inclinación de la superficie y γ es el azimut, luego la radiación directa en el plano inclinado queda descrita por la ecuación 4.10.

$$I_{bT} = I_b \cdot R_b \quad (4.10)$$

Para la contribución de la radiación debido a la reflexión se calcula asumiendo que el suelo es un reflector isotrópico, donde se define R_r como la razón entre la radiación

reflejada en un plano inclinado con respecto a la radiación total en una superficie horizontal.

$$R_r = 0,5(1 - \cos \beta)\rho_g \quad (4.11)$$

$$I_{gT} = R_r \cdot I \quad (4.12)$$

Para el cálculo del aporte de la radiación difusa en superficie inclinada se utiliza el modelo de Hay and Davies [44] , el cual considera la radiación circunsolar y radiación difusa isotrópica, método que plantea que bajo condiciones de cielo claro hay un incremento de la intensidad de la radiación difusa alrededor de el sol. Los autores plantean un valor ponderado utilizando el índice anisotrópico A_i , este índice es un porción de la radiación difusa como circunsolar y el resto es considerada isotrópica. El modelo es descrito por las ecuaciones 4.13 y 4.14.

$$A_i = \frac{I_{bn}}{I_{on}} \quad (4.13)$$

$$I_{dT} = I_d[0,5(1 - A_i)(1 + \cos \beta) + A_i R_b] \quad (4.14)$$

Donde I_{on} es la radiación extraterrestre de incidencia normal y I_{bn} es la radiación directa normal a la superficie

Finalmente la radiación en el plano inclinado queda representada por la ecuación 4.15.

$$I_t = I_{bT} + I_{dT} + I_{gt} \quad (4.15)$$

Los valores de radiación directa y difusa, en plano inclinado son utilizados como input en el Type 56 el cual simula las características físicas del edificio y la red de intercambio de calor, del mismo además de agregar las cargas internas presentes en las habitaciones.

Con la finalidad de obtener todos los inputs necesarios para la interacción del Type 56, se utiliza el Type 33, componente que está dentro de la categoría de propiedades termodinámicas de TRNSYS, el cual utiliza la temperatura ambiente, presión atmosférica en Santiago estimado por el valor de $102[kPa]$ y la humedad relativa como input, es capaz de calcular las propiedades del aire húmedo. La variable utilizada en el modelo es la temperatura de punto de rocío, la cual se obtiene a través correlaciones psicrométricas ASHRAE [45] y la ley de gases ideales.

Posteriormente a la obtención de la temperatura de punto de rocío, se procede a determinar la temperatura de cielo (T_{sky}) esta es definida por Martin(1984) como la temperatura de una superficie de cuerpo negro horizontal en equilibrio radiativo con el cielo y aislado de todas las otras rutas de calor[46]. El componente utilizado es Type 69-b el cual a través altura de la ciudad de Santiago sobre el nivel del mar (570[m]), temperatura de punto de rocío, temperatura ambiente, radiación directa y difusa en plano es capaz de obtener T_{sky} . Para el cálculo de la variable anteriormente descrita el componente utiliza un factor de nubosidad, este es calculado a través de la temperatura de punto de rocío y la temperatura ambiente por medio de un sub-rutina de TRNSYS.

4.2.2. Ganancias internas

En este modelo el Type 69-b es vinculado con el Type 56 el cual modela el comportamiento termodinámico del edificio a través de un enfoque multizona, este componente utiliza la descripción física de la edificación, es decir, geometría, materiales y condiciones de adyacencia entre las distintas habitaciones las cuales son procesadas en el programa TRNBUILD. Además es necesario añadir las ganancias térmicas internas producida en el edificio y las infiltraciones producidas con el medio ambiente.

El proceso de elección de material para cada muro, suelo y techo se explica en el capítulo 5 del presente escrito y las ganancias térmicas se explican a continuación:

- Uso de la habitación: Dada la alta variabilidad de este parámetro es necesario definir ciertas variables en consideración con el modelo utilizado. En el estudio realizado es de interés solamente el comportamiento de una de las habitaciones, por lo cual las consideraciones debido a las ganancias térmicas causadas por el uso de las habitaciones solamente hacen referencia al laboratorio del alumnos memoristas, alumnos que no tiene horarios fijos de trabajos cuyo en promedio de ocupación anual no excede a 4 personas en estadía simultanea en horarios laboral(8:00-18:00 hrs.). En el periodo de adquisición de datos (verano) solamente fue usada por un alumno en horario laboral. Las consideraciones térmica se evidencia en la tabla 4.1.
- Equipos en la habitación: Se consideran dos computadores con monitor, uno utilizado para investigación y el otro para recolección de datos los cuales generan una ganancia de 230[W]
- Calefacción : Se considera la ganancia termica debido a un aire acondicionado

Tabla 4.1: Ganancias internas debido a actividad dentro de a sala de estudio.

Grado de actividad	Ganancia total de calor [W]	Calor sensible[W]	Calor latente [W]
Trabajo liviano de oficina	150	75	75

que puede funcionar en modo refrigeración o como bomba de calor, con las características presentes en la tabla 4.2 donde se usa el modelo MWW0518G [47].

Tabla 4.2: Características aire acondicionado tipo mini split marca TRANE modelo MWW0518G

Marca	Modelo	Potencia eléctrica Frío/Calor	Potencia refrigeración [Kcal/h]	Potencia calefacción [Kcal/h]
TRANE	MWW0518G	1885W / 1775W	4500	4500

Para el moldeamiento térmico de aire acondicionado se implementa un ciclo de refrigeración por compresión, el cual es simulado en el programa Engineering Equation Solver (EES)[48]. El proceso de diseño del ciclo por compresión se hace a través de las características dadas en la tabla 4.2.

Una vez logrado los puntos de operación deseados se realiza un cálculo paramétrico en donde las variables medidas durante una semana $T_{ambiente}$ y T_{sala} (obtenidas en el protocolo de medición “Modelo sistema de bomba de calor”) se utilizan como input, para calcular a través del modelo generado en EES la potencia eléctrica necesaria lograr los puntos de operación deseados. Posteriormente se realiza una simulación en TRNSYS con los mismos puntos de operación para calcular el calor necesario para obtener la temperatura deseada.

Los datos obtenidos en el procedimiento descrito en el párrafo anterior se utilizan como un archivo externo, usado en el type 42, el cual es un interpolador de dos parámetros donde se obtiene el calor de la sala y la potencia eléctrica en función de temperatura de sala y ambiente. Este proceso es análogo para el funcionamiento como bomba de calor. El valor Q_{sala} es utilizado como ganancia térmica por convección. El encendido o apagado depende del controlador por histéresis Type 502 con una banda de $1[^\circ C]$, de la estación de año y el horario de uso de la sala.

- Infiltraciones: Este parámetro medido en ACH (air changes per hour) o su equivalente(1/h) el cual indica el movimiento de aire sin control a través de la en-

volvente del edificio este parámetro es sumamente difícil de medir y se produce según Bobadilla(2014) por los siguientes factores:

- Infiltración producida por el viento: Depende de la geometría del edificio, velocidad del viento y exposición al viento.
- Infiltraciones por efecto de diferencia de temperatura: Debido a la diferencia de densidad del aire.
- Infiltración o exfiltración por sistemas mecánicos de ventilación: Producido a la diferencia de presión debido a un mecanismo de ventilación[49].

En el modelo se utiliza un valor inicial de 0.035[1/h] un valor usual para edificios pasivos Boer(2009) [50].

4.2.3. Elementos de generación

Paneles fotovoltaicos

El componente utilizado para modelar el sistema de generación de la tecnología paneles fotovoltaico (PV) se utiliza el Type 194b. El modelo utilizada cuatro parámetros γ factor empírico del ajuste de curva PV, $I_{o,ref}$ corriente de saturación inversa del diodo en condiciones de referencia, $I_{L,ref}$ corriente fotoeléctrica del modulo en condiciones de referencia, $R_{s,ref}$ resistencia en serie del modulo en condiciones de referencia, para determinar la corriente y el voltaje distintas condiciones de irradiancia y temperatura. Dicho modelo fue descrito por Klein (2006) [51] y se representa en la figura 4.2. Es importante mencionar que en el modelo se consideran un string con dos módulos.

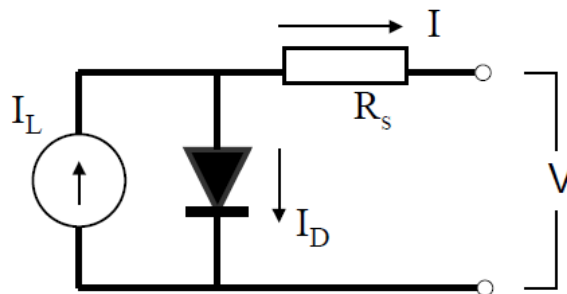


Figura 4.2: Circuito equivalente de 4 parámetros. Cortesía Klein(2006) manual Trnsys 17.

Los parámetros mencionados en el párrafo anterior son calculados a través de los datos entregados por el fabricante en las condiciones de referencia tabla 4.3, vol-

taje de circuito abierto V_{oc} , corriente de corto circuito I_{sc} , corriente en el punto potencia máxima I_{mp} y voltaje en punto de potencia máxima V_{mp} , además del coeficiente de temperatura en voltaje de circuito abierto $\beta_{V_{oc}}$ y $\alpha_{I_{sc}}$.

Tabla 4.3: Datos eléctricos Panel solar Silicio- policristalino, empresa Hareon solar modelo HR-315W.

Parámetros eléctricos	Modelo	HR-315W
STC	Potencia máxima [W]	315
AM 1.5	V_{mp}	36.98
1000 W/m ²	I_{mp}	8.52
Temperatura modulo	V_{oc}	45.29
25 °C	I_{sc}	9.11
	Eficiencia modulo(%)	16.01
	β	-0.32 %/°C
	α	0.055 %/°C
	Tolerancia	0 – 5[W]

La ecuación del circuito equivalente para el voltaje y corriente está dada por la ecuación 4.16, donde se determina las variables bajo las condiciones de operación en 4.17 y 4.18.

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{q}{\gamma k T_c} (V + I R_s)\right) - 1 \right] \quad (4.16)$$

$$I_L = I_{L,ref} \frac{G_t}{G_{t,ref}} \quad (4.17)$$

$$\frac{I_0}{I_{0,ref}} = \left(\frac{T_c}{T_{c,ref}} \right)^3 \quad (4.18)$$

Para obtener los cuatro parámetros anteriormente mencionados se utiliza las ecuaciones 4.19 , 4.20 , 4.21 y 4.22

$$I_{L,ref} \approx I_{sc,ref} \quad (4.19)$$

$$I_{0,ref} = \frac{I_{sc,ref}}{\exp\left(\frac{q}{k \gamma T_{c,ref}} V_{oc,ref}\right)} \quad (4.20)$$

$$\gamma = \frac{q(V_{mp,ref} - V_{oc,ref} + I_{mp,ref} R_s)}{k T_{c,ref} \ln\left(1 - \frac{I_{mp,ref}}{I_{sc,ref}}\right)} \quad (4.21)$$

$$\beta_{Voc} = \frac{\gamma k}{q} \left[\ln\left(\frac{I_{sc,ref}}{I_{o,ref}}\right) + \frac{T_c \alpha_{sc}}{I_{sc,ref}} - \left(3 + \frac{q\epsilon}{AkT_{c,ref}}\right) \right] \quad (4.22)$$

Donde $A = \gamma/N_s$, N_s es el número de celdas individuales en el módulo, k es la constantes de Boltzmann $[J/K]$, G_t es la radiación en el plano del panel, T_c es la temperatura de modulo ϵ es la banda del semiconductor.

Además se utilizan las ecuaciones para el cálculo de la temperatura del módulo en cada paso de tiempo y el producto de la transmitancia y absorptancias ($\tau\alpha$), las cuales queda descritas en las ecuaciones 4.23 y 4.24

$$\frac{\tau\alpha}{U_L} = \frac{T_{c,NOCT} - T_{a,NOCT}}{G_{T,NOCT}} \quad (4.23)$$

$$T_c = T_a + \frac{1 - \frac{\eta_c}{U_L}}{\frac{G_t \tau\alpha}{U_L}} \quad (4.24)$$

Donde U_L es el coeficiente de perdida térmica de conjunto.

Turbina de viento

Las turbinas de viento(WT) convierten la energía cinética del viento en energía mecánica. Existen diferentes WT que usualmente se clasifican según la orientación de eje de rotación pero en su mayoría poseen uno horizontal. Las características de la turbina utilizada en este modelo se representan en la tabla 4.4.

Tabla 4.4: Características turbina de viento modelo MAX-1600W, empresa MAX sunning wind

Modelo	MAX-1600W
Potencia nominal	1600 [W]
Potencia Máxima	1800 [W]
Voltaje nominal	48 V/110 V
Corriente nominal	33 A/14.5 A
Velocidad mínima de encendido	2 [m/s]
Dimensiones	1890*540*290 [mm]

El componente utilizado es el Type 90 basado en el trabajo de Quinlan (2000) [52] el cual considera parámetros que afectan al funcionamiento de este componente como la densidad del aire que es función de la temperatura, la presión y la humedad. El modelo se basa en la curva característica de potencia en función de la velocidad del viento, la cual es entregada por el fabricante (Figura 4.3) usando el modelo MAX-1600W [53]. Para este componente es necesario incluir carac-

terísticas geográficas y la velocidad del viento en el lugar de generación.

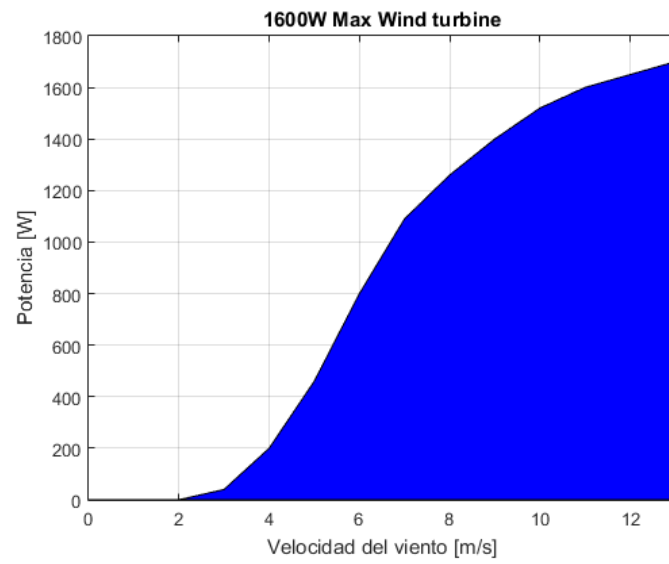


Figura 4.3: Curva de potencia modelo MAX-1600W, empresa MAX sunning wind

Capítulo 5

Calibración y validación del modelo

Como se ha mencionado anteriormente las simulaciones de edificios implican gran cantidad de variables, por lo tanto la calibración del modelo es fundamental para que las predicciones del modelo se asemejen al comportamiento térmico real de edificación, por lo cual es primordial utilizar una metodología de calibración, Coakley (2011) [54] plantea un método en donde se estipulan los siguientes cuatro pasos:

1. Recolección de datos / auditoría al edificio.

Este ítem se ve representado en el capítulo 3 “Metodología de medición” donde se realiza tanto la medición de los datos ambientales como del edificio, además del consumo del equipo de calefacción.

2. Desarrollo del modelo de la simulación energética del edificio basado en evidencia.

Esta sección ha sido descrita en el capítulo 4 “Descripción del modelo” en donde se genera el modelo del edificio a analizar.

3. Fijar los rangos de variabilidad para la investigación.

Este paso requiere dos puntos, en primera instancia la selección de la mejor aproximación para los parámetros de interés, y posteriormente la elección del rango de variación. Para este trabajo se utilizan los rangos presentes en la tabla 5.1 usando como referencia el valor recomendado por el Minvu [55] (Ministerio de Vivienda y Urbanismo) para las zonas térmicas en la cual está ubicado el edificio T-3 según el mismo organismo.

Tabla 5.1: Rangos de transmitancia térmica del tipo de superficie

Tipo de superficie	Minvu [W/m ² k]	Rango de variación	Rango de variación [W/m ² k]
Techo	0.47	[-35 % - 60 %]	[0.315 - 0.751]
Piso	0.7	[-27 % - 180 %]	[0.511 - 1.989]
Muro	1.9	[-38 % - 300 %]	[1.18 - 2.88]

4. Análisis de incertidumbre.

El autor Coakley(2011) plantea un análisis con un muestreo dentro del rango utilizando el método Hypercube Monte-Carlo (LHMC) y un análisis estadístico de ajuste de bondad para encontrar un conjunto de calibraciones aceptables, pero este método tiene un gran costo computacional, por lo cual, en este estudio se realiza un análisis simplificado realizando 125 simulaciones dentro de los rangos señalados en la tabla 5.1, realizándose combinaciones de los casos variando el material aislante de cada elemento constructivo.

Para decidir la combinación que se ajusta de mejor forma al comportamiento del modelo se utilizan los datos recopilados en el protocolo de medición “modelo sin sistema de refrigeración”, con estas simulaciones se realiza una ponderación de la diferencia entre los valores medidos y los simulados por cada superficie y la temperatura ambiente en la sala para cada hora de simulación, la cual está dada por en la ecuación 5.1.

$$Error_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1} (T_{measured} - T_{simulate})^2 \quad (5.1)$$

Siendo n el número de horas en la simulación. Luego el error de la simulación queda expresado por la expresión 5.2 se pondera con un peso mayor el error producido en la temperatura ambiente, con la finalidad de minimizar esta variable en comparación con las temperaturas de superficies dado que la temperatura ambiente es utilizada posteriormente como parámetro de control para los sistemas de calefacción y refrigeración.

$$Error_{simulacion} = \sum_{i=1} Error_{Tsuperficie} + 2Error_{Tambiental} \quad (5.2)$$

El resultado de la calibración se ve representado en la tabla 5.2 en conjunto con la variación porcentual con respecto al recomendado por el Minvu.

Tabla 5.2: Valor de transmitancia por superficie obtenidos en la calibración

Tipo de superficie	U value [W/m ² K]
Techo	0,76
Piso	1,99
Muro	2,08

En los siguientes gráficos se evidencia el resultado de la calibración del modelo con respecto al comportamiento termodinámico como muestran en las figuras 5.1 y 5.2

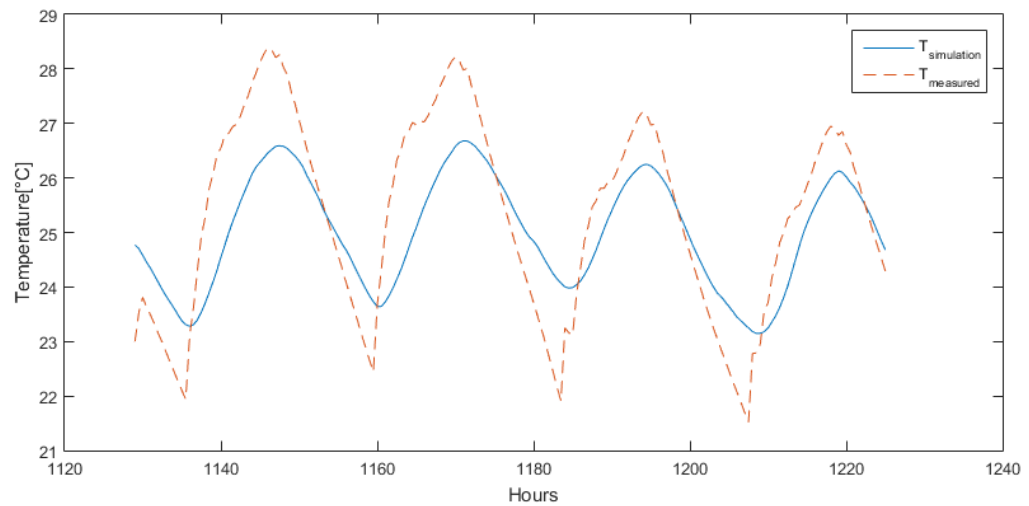


Figura 5.1: Comparación de temperatura ambiente simulada y medida en el laboratorio después de la calibración en la segunda semana de Febrero sin utilización de aire acondicionado. Utilizando infiltraciones 0.03[1/h]

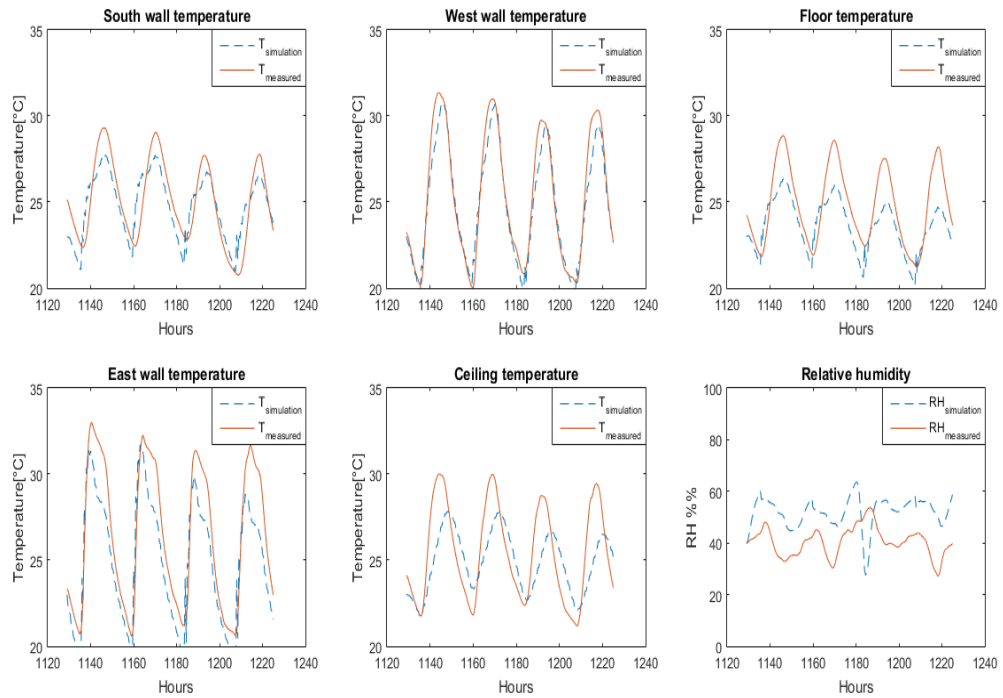


Figura 5.2: Comparación de temperatura simulada y medida después de la calibración para las diferentes superficies y humedad relativa en el laboratorio en la segunda semana de Febrero sin utilización de aire acondicionado. Utilizando infiltraciones 0.03[1/h]

Para evidenciar la similitud del modelo con las variables medidas en la tabla 5.3 se muestra la variación de temperatura máxima y el error porcentual promedio por cada superficie.

Tabla 5.3: Error porcentual y diferencia máxima en el modelo calibrado.

Parámetro	Error porcentual promedio [%]	Diferencia máxima[°C]
$T_{ambiente}$	3.87	2.28
T_{Sur}	4.48	3.21
T_{Oeste}	2.65	2.76
T_{suelo}	5.59	3.59
T_{Este}	6.8	4.24
T_{Techo}	6.63	4.44

■ Análisis infiltraciones

En este apartado se utiliza las ecuaciones 5.1 y 5.2 para encontrar el valor de infiltraciones que se ajusta de mejor forma a los valores medidos para esto se realiza un análisis paramétrico variando las infiltraciones desde 0.035[1/h] hasta 10[1/h], pero se nota que cualquier aumento en las infiltraciones genera un error mayor al valor inicial, lo cual se verifica en las figuras 5.3 y 5.4 simulación con

valor de infiltración igual 1 [1/h], se distingue en la figura 5.3 una variación notable en la respuesta temporal de la temperatura del laboratorio, la cual tiende a asemejarse a la temperatura ambiente, comportamiento que tiene menor influencia en la temperatura de pared pero al ser la temperatura de la sala un elemento de control se decide mantener el valor de infiltración previamente establecido.

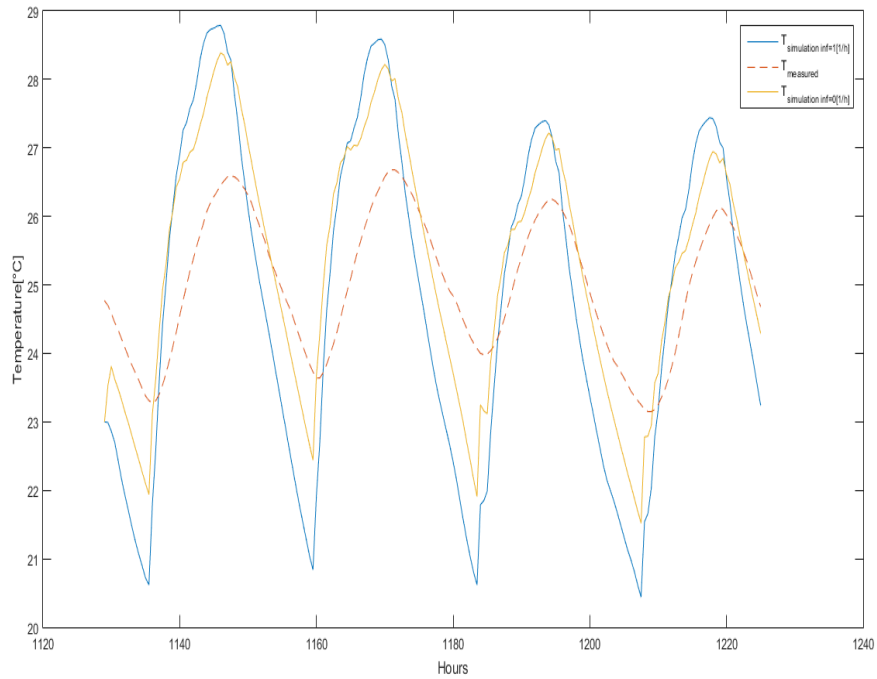


Figura 5.3: Temperatura de ambiental del laboratorio con infiltración de 1 [1/h] y en ausencia de estas en la segunda semana de febrero sin utilización de aire acondicionado.

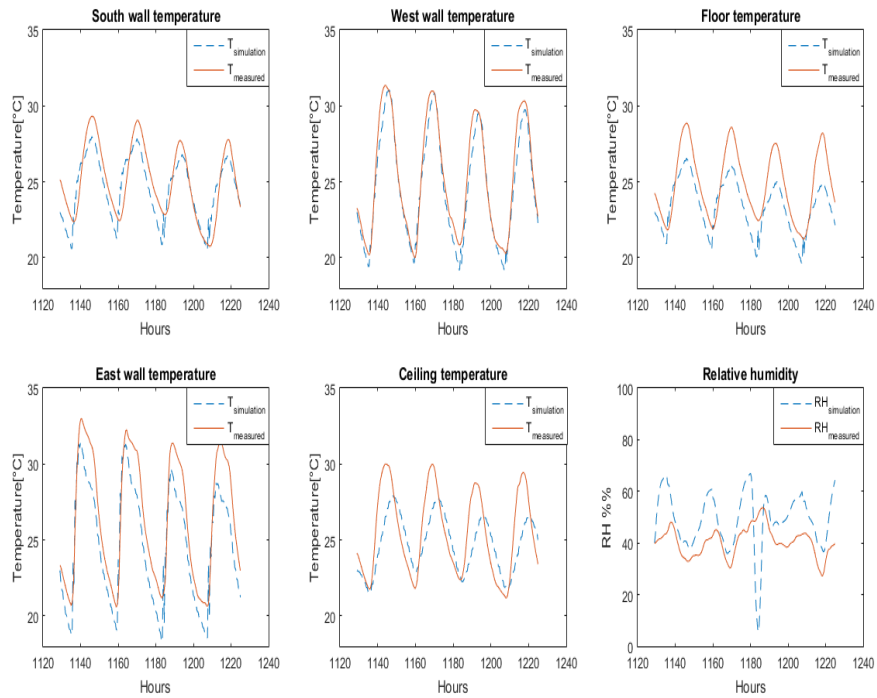


Figura 5.4: Temperatura de pared y humedad relativa en simulación incluyendo infiltraciones en la segunda semana de Febrero sin utilización de aire acondicionado.

5.1. Sistema HVAC

5.1.1. Bomba de calor

Para simular el sistema de bomba de calor se crea un ciclo de bomba de calor estándar como se muestra en la figura 5.5, como se comenta en la sección “Ganancias internas” se modela en el programa EES con el fin de obtener la potencia necesaria para llevar a cabo el ciclo entre la temperatura ambiente y la temperatura de la sala.

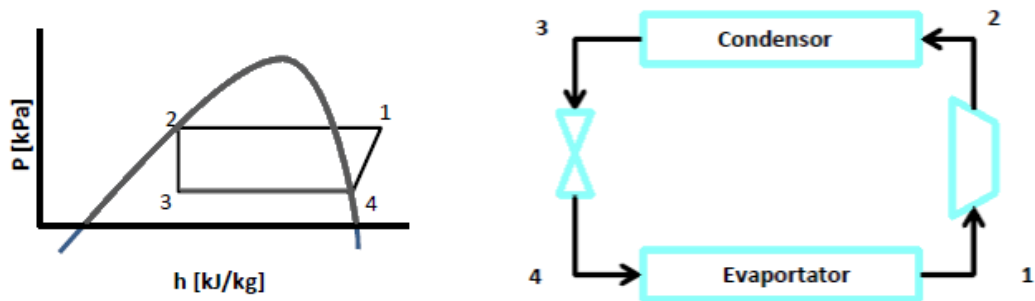


Figura 5.5: Ciclo genérico de bomba de calor y esquema de bomba de calor.

En el gráfico 5.6 se presenta el efecto del calor producido por la bomba de calor en

la temperatura ambiente de la sala. Por otro lado en la figura 5.7 se presenta consumo eléctrico medido y simulado debido al uso de la bomba de calor para dos días en la tercera semana de Junio.

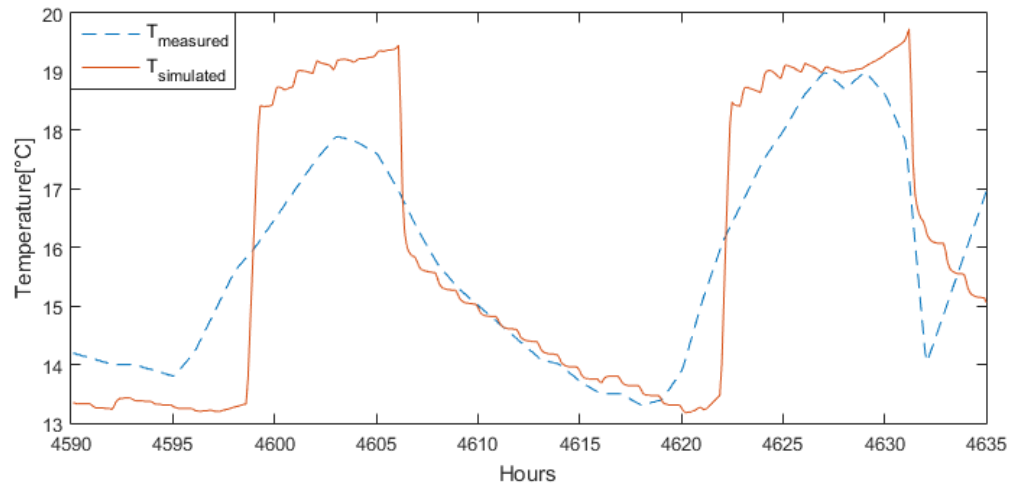


Figura 5.6: Temperatura del laboratorio medida y simulada con utilización de bomba de calor.

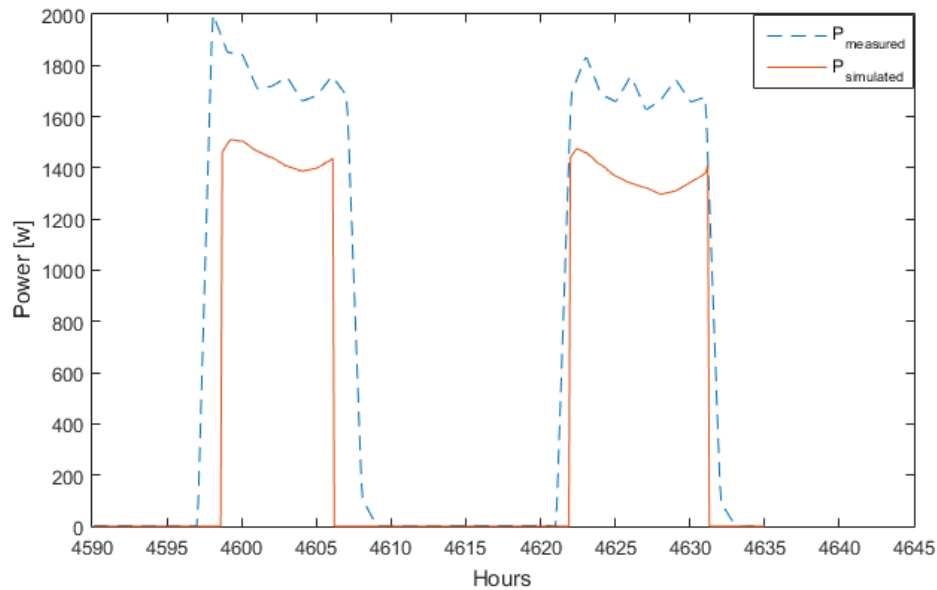


Figura 5.7: Consumo eléctrico bomba de calor medido y simulado.

5.1.2. Aire acondicionado

De forma análoga se realiza la simulación del aire acondicionado cuyo ciclo es similar al utilizado para la bomba de calor pero con dirección de flujo opuesta donde

se utiliza la ecuaciones 5.1 y 5.2 para la calibración del aire acondicionado variando el ancho banda del control por histéresis, en cual se obtiene figura 5.8 el cual muestra el perfil de temperatura del laboratorio con una temperatura consigna $25[^\circ C]$ simulada y medida.

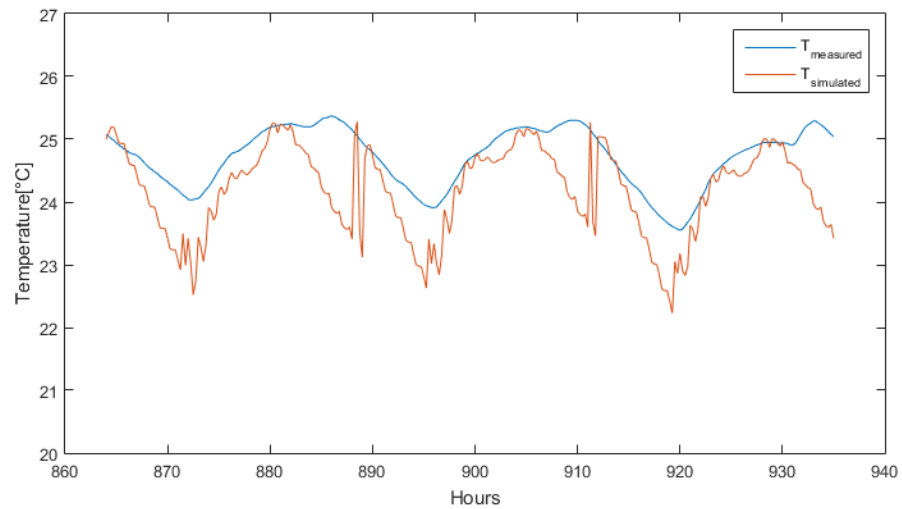


Figura 5.8: Temperatura del laboratorio medida y simulada con utilización de aire acondicionado.

Capítulo 6

Resultados y validación

Este capítulo tiene por objetivo la utilización del modelo para evidenciar la influencia de los parámetros de entrada del modelo en la predicción del modelo, el comportamiento térmico de la habitación debido al encendido del sistema de climatización, el perfil de generación anual del sistema PV y turbina de viento, además del perfil de consumo anual para diferentes temperaturas de consigna.

6.1. Estudio de sensibilidad del modelo

Para analizar la influencia de los parámetros ambientales (humedad relativa, radiación global horizontal y temperatura ambiente) se realiza una variación porcentual de los parámetros mencionados en un rango de $[-50\% + 50\%]$ y se analiza su influencia en la variación temperatura ambiente del laboratorio.

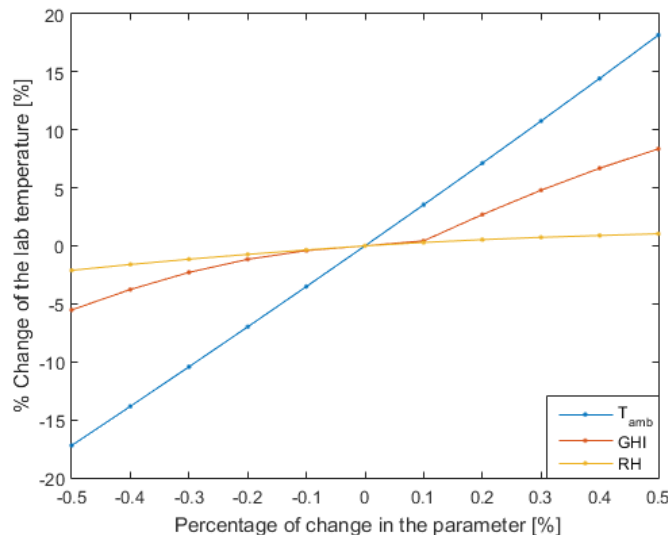


Figura 6.1: Análisis de sensibilidad de la temperatura del laboratorio con respecto a las variables ambientales.

La simulación realizada en la figura 6.1 considera un tiempo simulado de tres días de la última semana de Febrero, en la cual se calcula el error porcentual promedio con respecto a una simulación sin variación de los parámetros anteriormente mencionados. La figura 6.1 muestra que la variable con mayor influencia es la temperatura ambiente, la cual representa una variación de hasta un 17 % en la temperatura del laboratorio en el rango estudiado, lo que implica que es importante aumentar la precisión en la medición o predicción de este parámetro para futuros estudios. Por otro lado es importante notar que la humedad relativa ambiental representa solamente una influencia menor al 3 % por lo que para futuras simplificaciones del modelo bastaría con considerar este valor como una constante.

6.2. Tiempo de respuesta térmica.

En esta sección se analiza el comportamiento térmico del edificio en respuesta al encendido de un sistema HVAC.

6.2.1. Aire acondicionado

Estudio de encendido aire acondicionado

Se realiza el estudio de encendido del aire acondicionado con diferentes temperaturas de consigna para evidenciar el tiempo de respuesta del sistema considerando la inercia térmica del edificio. Se nota que la temperatura mínima de consigna es $21[^\circ C]$ dado que esta está limitada por la potencia máxima de enfriamiento del aire acondicionado como se evidencia en la figura 6.2 ya que con temperaturas menores a la anteriormente mencionada los perfiles de temperatura se sobreponen.

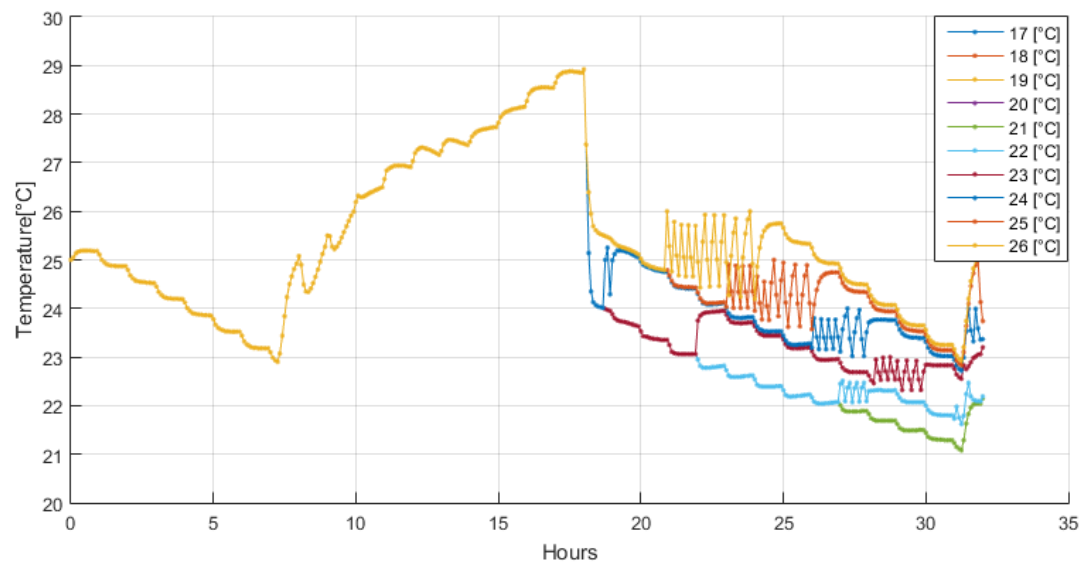


Figura 6.2: Temperatura del laboratorio medida y simulada con utilización de aire acondicionado.

En la figura 6.3 se evidencia el comportamiento térmico de la temperatura del laboratorio debido a diferentes horas de encendido de aire acondicionado para un temperatura de consigna de 22 [°C].

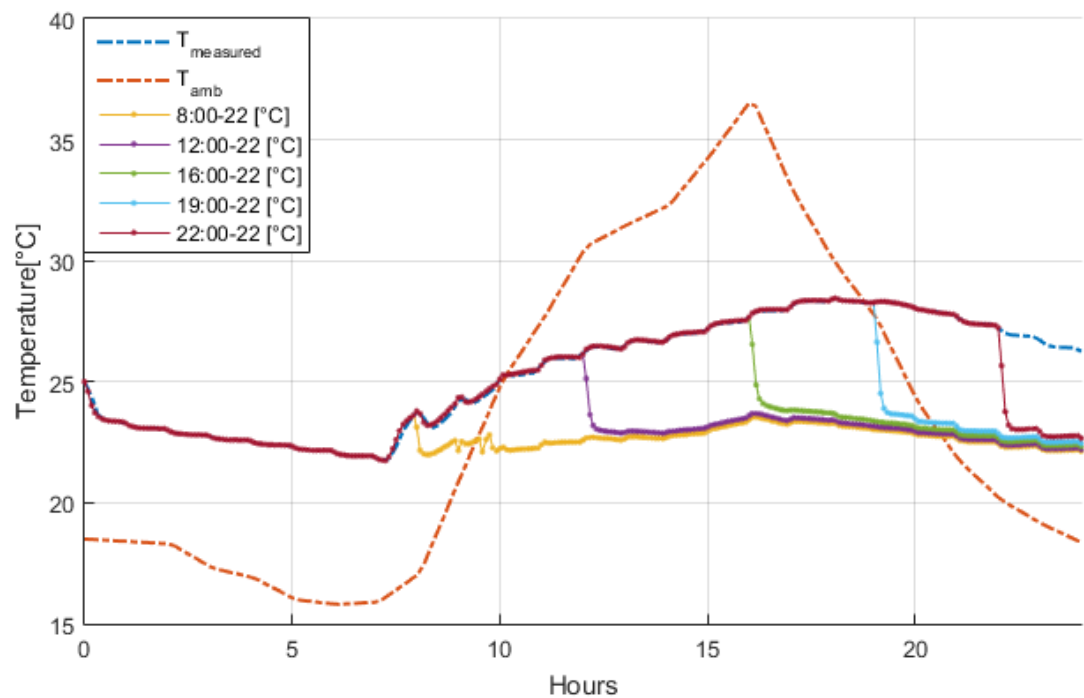


Figura 6.3: Encendido de aire acondicionado a distintas horas del día.

En la tabla 6.1 se resume el resultado de la simulación anteriormente mencionada

donde se evidencia la respuesta térmica debido al encendido del aire acondicionado. Es importante mencionar que para el estudio de la repuesta térmica se disminuyo la banda de histéresis a $0.25 [^{\circ}C]$ lo cual provoca un encendido y apagado intermitente del aire acondicionado. En la tabla 6.1 se muestra el tiempo de repuesta, que se traduce en el tiempo transcurrido desde el encendido del aire acondicionado y la variación de temperatura que corresponde a la diferencia de temperatura entre el valor consiga y la temperatura al instante del encendido del equipo.

Tabla 6.1: Tiempo de respuesta en el encendido de aire acondicionado para una temperatura de consigna $22[^{\circ}C]$.

Hora encendido	Tiempo de respuesta [min]	Variación temperatura $[^{\circ}C]$
8:00	12	1.48
12:00	36	3.19
16:00	48	3.82
19:00	42	4.16
22:00	66	4.46

6.2.2. Bomba de calor

Estudio de encendido bomba de calor

Se realiza el estudio de encendido de la bomba de calor con diferentes temperaturas de consiga para evidenciar el tiempo de respuesta del sistema considerando la inercia térmica del edificio. Se nota que la temperatura máxima de consigna es $26[^{\circ}C]$ dado que esta esta limitada por la potencia máxima de calefacción como se evidencia en la figura 6.4 ya que con temperaturas menores a la anteriormente mencionada los perfiles de temperatura se sobreponen.

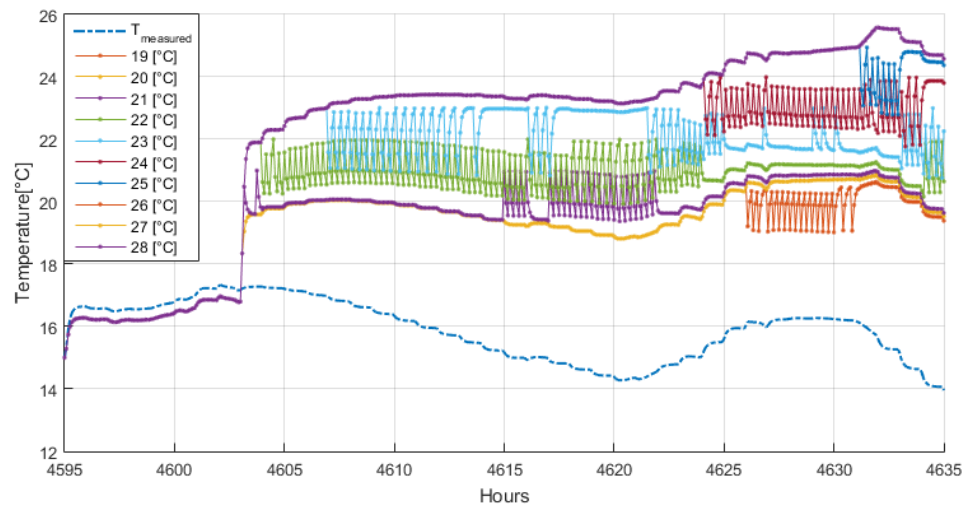


Figura 6.4: Temperatura del laboratorio medida y simulada con utilización de una bomba de calor.

En la figura 6.5 se evidencia el comportamiento térmico de la temperatura del laboratorio debido a diferentes horas de encendido de la bomba de calor para una temperatura de consigna de 20 [°C].

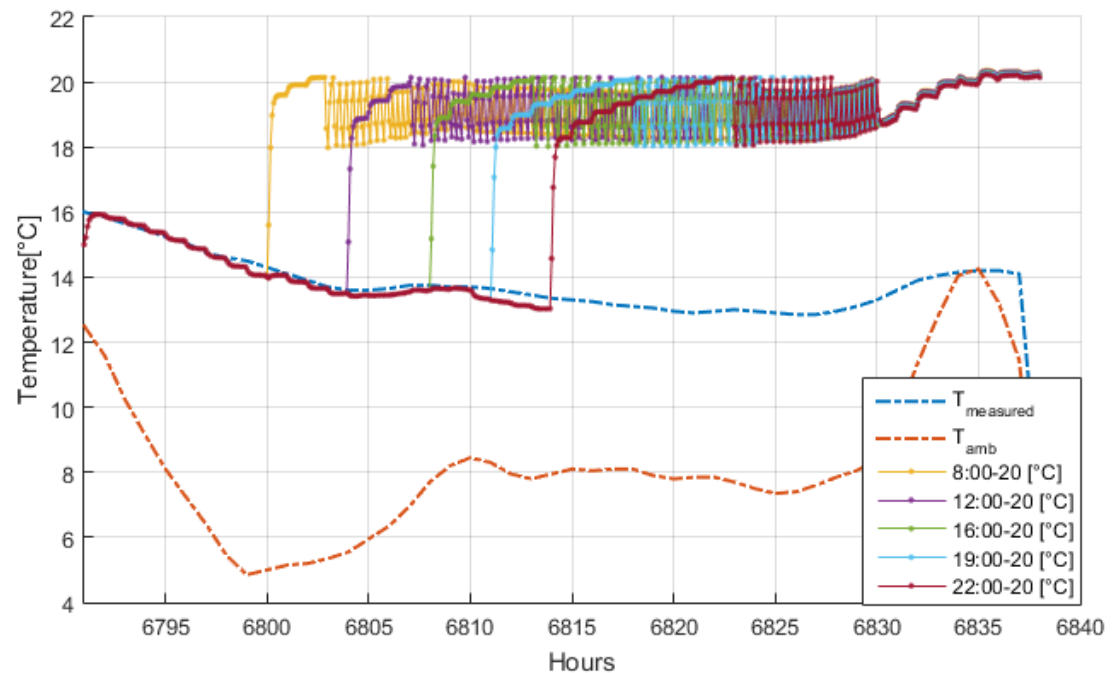


Figura 6.5: Temperatura del laboratorio medida y simulada con utilización de una bomba de calor.

En la tabla 6.2 se resume el resultado de la simulación anteriormente mencionada donde se evidencia la respuesta térmica debido a la bomba de calor. Es importante mencionar que para el estudio de la repuesta térmica se disminuyo la banda de histéresis a

0.25 [$^{\circ}C$] lo cual provoca un encendido y apagado intermitente del aire acondicionado.

Tabla 6.2: Tiempo de respuesta en el encendido de la bomba de calor para una temperatura de consigna 20[$^{\circ}C$].

Hora encendido	Tiempo de respuesta [h]	Variación temperatura[C]
8:00	2.04	6.13
12:00	3.20	6.63
16:00	3.40	6.43
19:00	5.30	6.61
22:00	8.06	7.06

6.3. Potencial de generación y perfil de carga

Se simula la generación de PV y una turbina de viento para durante un año típico usando el archivo de datos ambientales de Santiago de Chile proporcionado por TRNSYS. Además se genera el perfil de consumo por la bomba de calor y la el aire acondicionado para distintas temperaturas de control.

Perfil de carga térmica

El estudio realizado considera el uso de sistema de aire acondicionado por estación vale decir, que solamente considera como época de uso de aire acondicionado desde el primero Enero hasta el 30 de abril y desde el primero de septiembre hasta el 31 de Diciembre, el uso de la modalidad de calefacción se utiliza desde el primero de mayo hasta el 31 de agosto. El horario de uso del laboratorio se considera desde 10:00 hasta las 20:00 hrs. Sin la utilización del espacio entre las 12:00 y 13:00 hrs. Además se considera que la utilización del laboratorio solamente rige de lunes a viernes. El control por histéresis tiene una ancho de banda $1[^\circ C]$

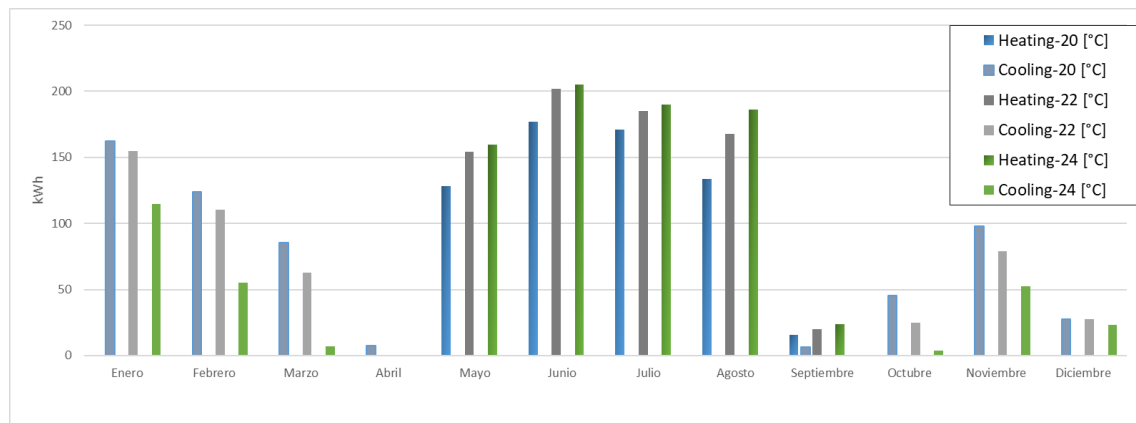


Figura 6.6: Perfil de carga térmica mensual debido a la calefacción y aire acondicionado para distintas temperaturas de consigna.

Se evidencia en la figura 6.6 que en periodo de aire acondicionado una temperatura de consigna menor implica una mayor carga térmica caso contrario es mostrado en época de uso en la modalidad de calefacción. En la tabla C.1 se muestra la carga térmica mensual para distintas temperaturas de consigna y en la tabla 6.3 se evidencia la carga térmica anual para configuraciones de temperatura de consigna constante y una configuración mixta que considera un temperatura consiga de $24[^\circ C]$ en modalidad aire acondicionado y $20[^\circ C]$ modalidad calefacción, esta configuración es la que posee menor demanda térmica anual. La configuración mixta demuestra que solamente modificando la temperatura de consigna dentro del rango de confort es posible generar

una disminución importante en la carga térmica.

Tabla 6.3: Carga térmica anual en [kWh] para diferentes temperaturas de consigna.

Temperatura consigna	Carga térmica anual [kWh]
20 [°C]	1182.12
22 [°C]	1189.48
24 [°C]	1021.57
Mixta	965.97

Perfil de consumo eléctrico y potencial de generación

Las simulaciones realizadas utilizan las misma consideraciones mencionadas anteriormente. En la figura 6.7 muestra el consumo eléctrico mensual necesario para lograr diferentes temperatura de consigna en la habitación, también el perfil de generación del sistema PV en MPPT(Maximum Power Point Tracking) de la configuración descrita en la sección elementos de generación, además se simula el comportamiento de la turbina de viento anteriormente descrita con la velocidad de viento presente en archivo TMY de Santiago de Chile proporcionado por Trnsys, es importante considerar que este parámetro puede presentar un gran diferencia dependiendo de la locación del sistema de adquisición de datos, por lo que al no existir información en una ubicación cercana a la turbina se considera la generación solamente con un valor de referencia de producción de energía pero es requerida mayor información para ser implementada en el modelo final del proyecto.

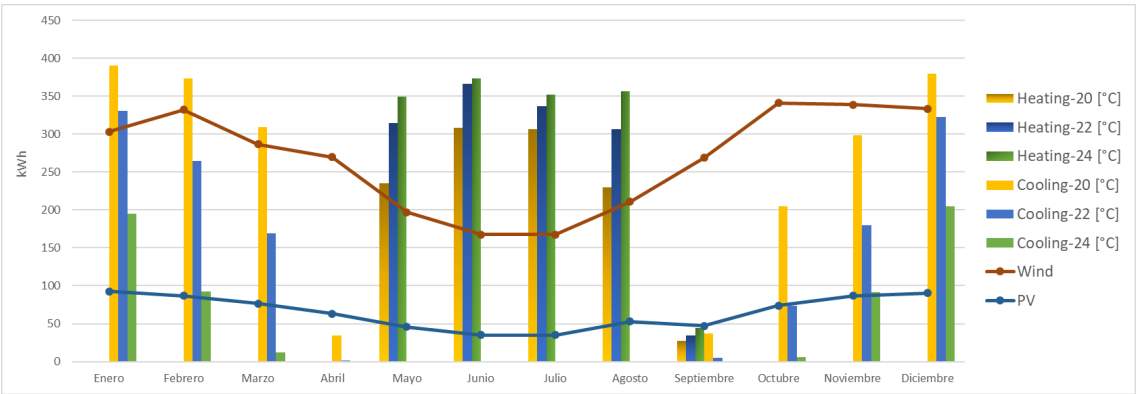


Figura 6.7: Perfil de consumo eléctrico y potencial de generación mensual en un año típico.

El consumo eléctrico mensual debido a calefacción y refrigeración mensual se ve representado en la tabla C.2 y el consumo anual para un temperatura de consigna cons-

tante y mixta se refleja en la tabla 6.4, además se incluye el porcentaje de consumo que puede ser suplido por la generación PV, es importante mencionar que este valor solo representa la generación total anual, pero no considera la gestión energética necesaria para el uso de esta energía lo cual será implantado con el uso de un banco de baterías en etapas posteriores del proyecto.

Tabla 6.4: Consumo eléctrico anual para distintas temperatura de consiga y porcentaje de generación PV con respecto al consumo anual

Temperatura consigna	Consumo eléctrico anual [kWh]	Porcentaje generación PV
20 [$^{\circ}C$]	3132.71	26.57 %
22 [$^{\circ}C$]	2705.63	30.61 %
24 [$^{\circ}C$]	2078.89	39.53 %
Mixta	1621.17	49.41 %

Capítulo 7

Conclusiones y recomendaciones

7.1. Conclusiones

- El modelo térmico utilizado en este trabajo de título contempla un modelo del tipo ingenieril nodal, el cual da respuesta a las necesidades de investigación planteadas, modelar el comportamiento térmico de una habitación en conjunto con un sistema de calefacción y refrigeración incluyendo elementos de generación de energía renovables no convencionales.
- Como conclusión del trabajo bibliográfico realizado en el estado del arte se desprende que los modelos híbridos representan una tendencia de investigación que favorece la versatilidad de las aplicaciones del modelo, por lo cual el proyecto en el cual esta memoria se enmarca se vería beneficiado en la implantación de métodos estadísticos (Genetic algorithm, Neural Networks y Support Vectors Machine) para la obtención de sistemas de control y/o aplicaciones predictivas del modelo.
- El protocolo de medición creado faculta la adquisición de datos necesarios que permiten generar el modelo bajo distintas condiciones de uso y levantar información mínima para la calibración del modelo.
- Las propiedades térmicas de los materiales escogidos en la calibración dan como resultado un error porcentual promedio menor al 7 % con respecto a los perfiles de temperatura en las distintas superficies.
- Se establece un valor de infiltraciones igual a 0.035[ACH] debido a que cualquier valor mayor a este aumenta el error porcentual promedio y afecta a la respuesta temporal de la temperatura ambiente del laboratorio.
- Los parámetros de estudio en el análisis de sensibilidad del modelo muestran que la variable con mayor influencia en la temperatura del laboratorio es la temperatura ambiente con un variación porcentual del 17 % en un variación del 50 %

del parámetro de entrada por lo cual es necesario aumentar la precisión de la adquisición de esta variable. El segundo parámetro con mayor influencia porcentual en la variable de control es la radiación global horizontal con una cercana al 10 % por lo cual también es necesario enfocar esfuerzos en disminuir los errores de medición estimación de esta variable. Por último la baja influencia de la humedad relativa genera la posibilidad de futuras simplificaciones del modelo considerando este parámetro como un valor constante.

- Los límites de operación para el sistema de aire acondicionado es una temperatura de consigna de 21 [$^{\circ}C$] en modo refrigeración y 26 [$^{\circ}C$] para la modalidad bomba de calor.

7.2. Recomendaciones

- Protocolo de medición:
 - Se recomienda realizar la medición de velocidad y dirección de viento en una locación cercana a la turbina de viento.
 - Registro de producción PV y WT para contrastar con el modelo.
 - Implementar sensores para medir el uso de habitación.
 - Medición del consumo eléctrico del laboratorio de memoristas .
- Calibración modelo:
 - Es requerido una selección con precisión de materiales para el techo y el piso. Lo cual se puede lograr implementando un mayor número de simulaciones que involucren distintos espesores de aislante.
- Control:
 - Realizar un estudio para modelar de manera más precisa el control con la finalidad de disminuir el error en el comportamiento térmico y la potencia eléctrica utilizada por el sistema. Esto implica elegir una banda de histéresis más adecuada u otro sistema de control.

Bibliografía

- [1] Daniel Burmester, Ramesh Rayudu, Winston Seah, and Daniel Akinyele. A review of nanogrid topologies and technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67:760–775, 2017.
- [2] Raúl Obrecht Ihl. Caracterización del consumo energético residencial en la región metropolitana y análisis de escenarios de eficiencia energética memoria. page 92, 2016.
- [3] Nelson Fumo. A review on the basics of building energy estimation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31:53–60, 2014.
- [4] Lukas G. Swan and V. Ismet Ugursal. Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8):1819–1835, 2009.
- [5] Linda Pedersen. Use of different methodologies for thermal load and energy estimations in buildings including meteorological and sociological input parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(5):998–1007, 2007.
- [6] Aurélie Fouquier, Sylvain Robert, Frédéric Suard, Louis Stéphan, and Arnaud Jay. State of the art in building modelling and energy performances prediction: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23:272–288, 2013.
- [7] Soteris A Kalogirou. Artificial neural networks in renewable energy systems applications: a review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 5(4):373–401, 2001.
- [8] Hai-xiang Zhao and Frédéric Magoulès. A review on the prediction of building energy consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6):3586–3592, 2012.
- [9] Residential Energy Services Network. Procedures for Verification of RESNET Accredited HERS Software Tools. 2006.
- [10] ASHRAE Fundamentals Handbook. American society of heating, refrigerating and air-conditioning engineers. Inc.: Atlanta, GA, USA, 2009.

- [11] Oleg Zikanov. Essential computational fluid dynamics. John Wiley & Sons, 2010.
- [12] COMSOL Multiphysics. Comsol multiphysics user guide (version 4.3 a). COMSOL, AB, pages 39–40, 2012.
- [13] ANSYS Fluent. Ansys fluent theory guide. ANSYS Inc., USA, 15317:724–746, 2011.
- [14] USRD ESI. Cfd-ace (u) v2004 user’s manual, esi-cfd inc. Huntsville, AL, USA, 2004.
- [15] Washington Bellevue. Tecplot user’s manual. Amtec Engineering Inc, 2003.
- [16] Gang Tan and Leon R Glicksman. Application of integrating multi-zone model with cfd simulation to natural ventilation prediction. *Energy and Buildings*, 37(10):1049–1057, 2005.
- [17] Etienne Wurtz, Laurent Mora, and Christian Inard. An equation-based simulation environment to investigate fast building simulation. *Building and Environment*, 41(11):1571–1583, 2006.
- [18] Ahmed Chérif Megri and Fariborz Haghighat. Zonal modeling for simulating indoor environment of buildings: Review, recent developments, and applications. *Hvac&R Research*, 13(6):887–905, 2007.
- [19] Fangting Song, Bin Zhao, Xudong Yang, Yi Jiang, Vipin Gopal, Gregory Dobbs, and Michael Sahm. A new approach on zonal modeling of indoor environment with mechanical ventilation. *Building and Environment*, 43(3):278–286, 2008.
- [20] Anne Voeltzel, François Rémi Carrié, and Gérard Guarracino. Thermal and ventilation modelling of large highly-glazed spaces. *Energy and Buildings*, 33(2):121–132, 2001.
- [21] Jun Gao, Jia-ning Zhao, Xiao-dong Li, and Fu-sheng Gao. A zonal model for large enclosures with combined stratification cooling and natural ventilation: Part 1—model generation and its procedure. *Journal of solar energy engineering*, 128(3):367–375, 2006.
- [22] Hongyu Huang, Fariborz Haghighat, and Chang-Seo Lee. An integrated zonal model for predicting indoor airflow, temperature, and voc distributions. *ASHRAE Transactions*, 111(1), 2005.
- [23] Emmanuel Bozonnet, Rafik Belarbi, and Francis Allard. Modelling solar effects on the heat and mass transfer in a street canyon, a simplified approach. *Solar Energy*, 79(1):10 – 24, 2005.

- [24] Lana Kenjo, Christian Inard, and Dominique Caccavelli. Experimental and numerical study of thermal stratification in a mantle tank of a solar domestic hot water system. *Applied thermal engineering*, 27(11-12):1986–1995, 2007.
- [25] Ahmed Cherif Megri and Yao Yu. New calibrated zonal model (poma+) for temperature and airflow predictions. *Building and Environment*, 94:109–121, 2015.
- [26] Zhihang Song, Bruce T Murray, and Bahgat Sammakia. A dynamic compact thermal model for data center analysis and control using the zonal method and artificial neural networks. *Applied thermal engineering*, 62(1):48–57, 2014.
- [27] Sanford A Klein. *Trnsys-a transient system simulation program*. University of Wisconsin-Madison, Engineering Experiment Station Report, pages 38–12, 1988.
- [28] Drury B Crawley, Linda K Lawrie, Curtis O Pedersen, and Frederick C Winkelmann. *Energy plus: energy simulation program*. ASHRAE journal, 42(4):49–56, 2000.
- [29] JA Clarke and D McLean. *Esp-a building and plant energy simulation system*. Strathclyde: Energy Simulation Research Unit, University of Strathclyde, 1988.
- [30] Helmut E Feustel. *Comis—an international multizone air-flow and contaminant transport model*. *Energy and Buildings*, 30(1):3–18, 1999.
- [31] Harry Boyer, Jean-Pierre Chabriat, Brigitte Grondin-Perez, C Tourrand, and J Brau. Thermal building simulation and computer generation of nodal models. *Building and environment*, 31(3):207–214, 1996.
- [32] D.G. Stephenson and G.P. Mitalas. Calculation of heat conduction transfer functions for multi-layers slabs. *Air Cond. Engrs. Trans; (United States)*.
- [33] Douglas C Hittle. Calculating building heating and cooling loads using the frequency response of multilayered slabs. Technical report, CONSTRUCTION ENGINEERING RESEARCH LAB (ARMY) CHAMPAIGN IL, 1981.
- [34] Xiang Qian Li, Youming Chen, JD Spitler, and D Fisher. Applicability of calculation methods for conduction transfer function of building constructions. *International Journal of Thermal Sciences*, 48(7):1441–1451, 2009.
- [35] Athienitis Andreas, Cellura Maurizio, Chen Yuxiang, Delisle Véronique, Bourdoukan Paul, and Kapsis Konstantinos. Modeling and design of Net ZEBs as integrated energy systems, chapter 2, pages 9–74. Wiley-Blackwell, 2015.

- [36] GP Mitalas and JG Arseneault. Fortran IV program to calculate z-transfer functions for the calculation of transient heat transfer through walls and roofs. National Research Council Canada, Division of Building Research, 1970.
- [37] Glen E Myers. Analytical methods in conduction heat transfer. Number BOOK. Genium Publishing Corporation, 1987.
- [38] Bing Zheng and Guorong Wang. Leverrier’s algorithm and cayley–hamilton theorem for 2-d system. Applied mathematics and computation, 160(3):725–738, 2005.
- [39] Teitelman Lipchenca. Medición del efecto de la instalación de una lámina reflectora y selectiva de radiación solar en la producción de energía eléctrica de un panel fotovoltaico, 2017.
- [40] M Murray, Neil Finlayson, Michaël Kummert, and John Macbeth. Live energy trnsys–trnsys simulation within google sketchup. In Eleventh International IB-PSA Conference, Glasgow, Scotland. pp1389-1396, 2009.
- [41] Tamami Kusuda and Paul R Achenbach. Earth temperature and thermal diffusivity at selected stations in the united states. Technical report, National Bureau of Standards Gaithersburg MD, 1965.
- [42] Douglas T Reindl, William A Beckman, and John A Duffie. Diffuse fraction correlations. Solar energy, 45(1):1–7, 1990.
- [43] John A Duffie and William A Beckman. Solar engineering of thermal processes. John Wiley & Sons, 2013.
- [44] JE Hay and JA Davies. Calculation of the solar radiation incident on an inclined surface. proceedings, first canadian solar radiation data workshop. Toronto, Ontario, Canada, 1978.
- [45] ASHRAE Handbook et al. Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta, 111, 2001.
- [46] Marlo Martin and Paul Berdahl. Characteristics of infrared sky radiation in the united states. Solar energy, 33(3-4):321–336, 1984.
- [47] Varios Autores. Mini split 2015. Accedido en 09-07-2018 a <http://www.trane.com/commercial>.
- [48] Sanford A Klein and FL Alvarado. EES: Engineering equation solver for the Microsoft Windows operating system. F-Chart software, 1992.

- [49] A Bobadilla, R Arriagada, R Figueroa, C Muños, R Espinoza, M Díaz, M Trebilcock, A Fritz, and J Fookes. Manual de hermeticidad al aire de edificaciones. Universidad del Bío-Bío, Centro de Investigación en Tecnologías de la Construcción (CITEC UBB),(Dirección de Extensión en Construcción) DECON UC. Chile, 2014.
- [50] BJ de Boer, I Kondratenko, D Jansen, L Joosten, and C Boonstra. Passiefhuis en epn onderzoek naar de waardering van passiefhuizen volgens epn en phpp. 2009.
- [51] Jürgen Helmut Eckstein. Detailed modelling of photovoltaic system components. PhD thesis, University of Wisconsin–Madison, 1990.
- [52] P Quinlan. A time-series wind turbine array simulator. In PROCEEDINGS OF THE SOLAR CONFERENCE, pages 231–236. AMERICAN SOLAR ENERGY SOCIETY; AMERICAN INSTITUTE OF ARCHITECTS, 2000.
- [53] Varios Autores. Sunning wind. Accedido en 14-08-2018 <http://www.sunningwind.com>.
- [54] Daniel Coakley, Paul Raftery, Padraig Molloy, and Gearóid White. Calibration of a detailed bes model to measured data using an evidence-based analytical optimisation approach. Proceedings of Building Simulation 2011, 2011.
- [55] MINISTERIO de Vivienda y Urbanismo and INSTITUTO de la Construcción. Manual de aplicación reglamentación térmica, 2006.

Anexo A

Instrumentos de medición

ENTRADA CONFIGURABLE

• Alimentación	: 18 - 32 VDC
• Salida	: 0/4 - 20 mA, 2 cables.
• Resistencia	: 0 - 400Ω.
• Exactitud	: PT 100 $\leq \pm 0,5^{\circ}\text{C}$. - T/C tipo J,K $\leq \pm 2^{\circ}\text{C}$.
• Configuración	: por Software (en Servicio Técnico Veto).
• Temperatura trabajo	: 0 + 50 °C
• Tamaño	: 100 x 20 x 105 mm.
CÓDIGO	RANGO CONFIGURABLE
K4041021	J -210....+ 1200 °C
	K -200....+ 1370 °C
K4041048 Aislación Galvánica (1500V)	R -50....+ 1760 °C
	S -50....+ 1760 °C
	T -200....+ 400 °C
	PT 100 -200....+ 850 °C
ENTRADA FIJA	
K404103K K4041056 c/aislación galvanica (1500V)	PT 100 -200....+ 850



Figura A.1: Transmisor para riel DIN utilizado para conexión PT100

Transmisores de Humedad / Temp **34.200**
Salida 4 - 20 mA **2 / 2**
ABR / 18



CÓDIGO	A6041928
Mide humedad condensada	NO
Aplicación	Ambiental/ductos
Rango humedad	0 + 100 % HR (4-20mA)
Exactitud humedad	±3 % HR
Rango temperatura trabajo	-20 + 80 °C (4-20 mA)
Exactitud temperatura	±0,4 °C
Alimentación	12 - 24 VDC
Tamaño	300 x Ø6 mm
Largo cable	3 m

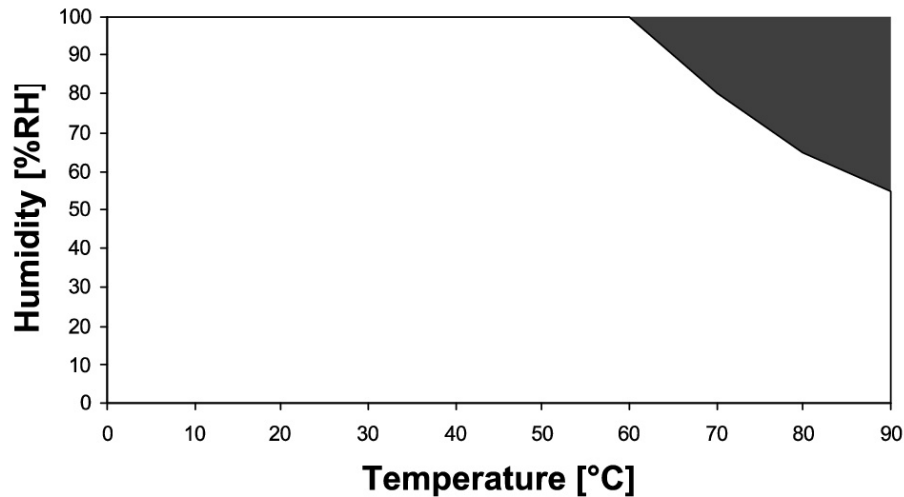
Figura A.2: Ficha técnica sensor de Humedad y temperatura

TINYTAG RH LOGGERS

Operating Range

0% to 95% RH (Non-condensing)
between -20°C and +85°C, but see
sensor working range below.

RH Sensor working range



Accuracy

± 3% RH at 25°C.

Temperature Dependency is low.

Resolution is better than 0.5% RH.

10

Figura A.3: Ficha técnica sensor de Humedad Tinytag



Features

Memory Size : 32k (Non-volatile)
 No. of Readings : 16000 (approx)
 Resolution : 12 bit
 Trigger Start : Magnetic reed switch
 Delayed Start : Relative / Actual
 up to 45 days
 Stop Options : When Full
 After n Readings
 Never (Wrap around)
 Reading Types : Actual, Min, Max.
 Logging Interval : 1 sec to 10 days
 Offload : While stopped or
 when logging in
 minute multiples
 Alarms : Two, fully
 Programmable
 Functional Range : -40°C → +85°C /
 -40°F → +185°F
 IP Rating : IP68 waterproof
 Battery Life : Up to 5 years

Sensor Details

Range : -40°C → +125°C /
 -40°F → +257°F
 Sensor Type : Standard Probe with
 10k NTC Thermistor
 Resolution : 0.03°C at 25°C /
 0.054°F at 77°F

Choice of probe depends on the
 application. See individual data sheets for
 detailed probe specifications.

Approvals

This equipment complies with part 15 of the
 FCC Rules. Operation is subject to the
 following two conditions: (1) this device
 may not cause any harmful interference,
 and (2) this device must accept any
 interference received, including interference
 that may cause undesired operation.

This product is manufactured by Gemini
 Data Loggers (UK) Ltd. to EN ISO 9002 part
 2 (Certificate No. 6134), and is CE approved
 to EN50081 part 1:1992 and EN50082 part
 1 and 2:1992/95 with any standard leads or
 probes supplied.



NAMAS traceable calibration certificates are
 available on individual units.

Mechanical Data

Case Style : IP68 Style

Case Dimensions

Height : 34mm / 1.34
 Width : 59mm / 2.32
 Depth : 80mm / 3.15
 Weight : 110g / 3.9 oz.

Notes:

Battery replacement is recommended
 every 2 years. It may be replaced with
 Saft 3.6V 1/2AA Lithium cells. Stop the
 unit logging before replacing the battery.

Functional Range describes the range
 over which the logger will function, **not**
 the sensor range over which it will record.

Special Notes

When using the units at low temperatures, condensation may form. Before opening the case
 for any reason, allow the units to reach room temperature.

The IP68 rating is only valid to depths of 50ft (15m) and only when the connector cap and
 sensor probe are securely fitted.

Interface Information and Related Products

To use your Tiny Data Logger you will require:

A suitable sensor probe for your application. (Includes PB-4724, PB-4730, PB-4750, PB-4770). See individual data sheets for details.
 Tinytag interface cable (CAB-0007), PC with GLM for Windows™ (SW-0009) or Easyview for Windows 95™ (SW-0500).

Further Related Products:

ACS-6000 Trigger Start Magnet
 SER-9532 Tinytag Plus Service Kit including battery, seal and silica gel pack.
 TG12-0017 Tinytag Plus High Resolution Range G (-40°C to 85°C / -40°F to +185°F) with integral sensor.

Applications

Pharmaceuticals
 Research

Gemini Data Loggers Pty
 Australia

Gemini Data Loggers UK Ltd
 UK

Gemini Data Loggers Inc
 USA

<http://www.geminidataloggers.com>

e-mail: sales@geminidataloggers.com

Figura A.4: Ficha técnica sensor de temperatura Tinytag

Anexo B

Planos edificio

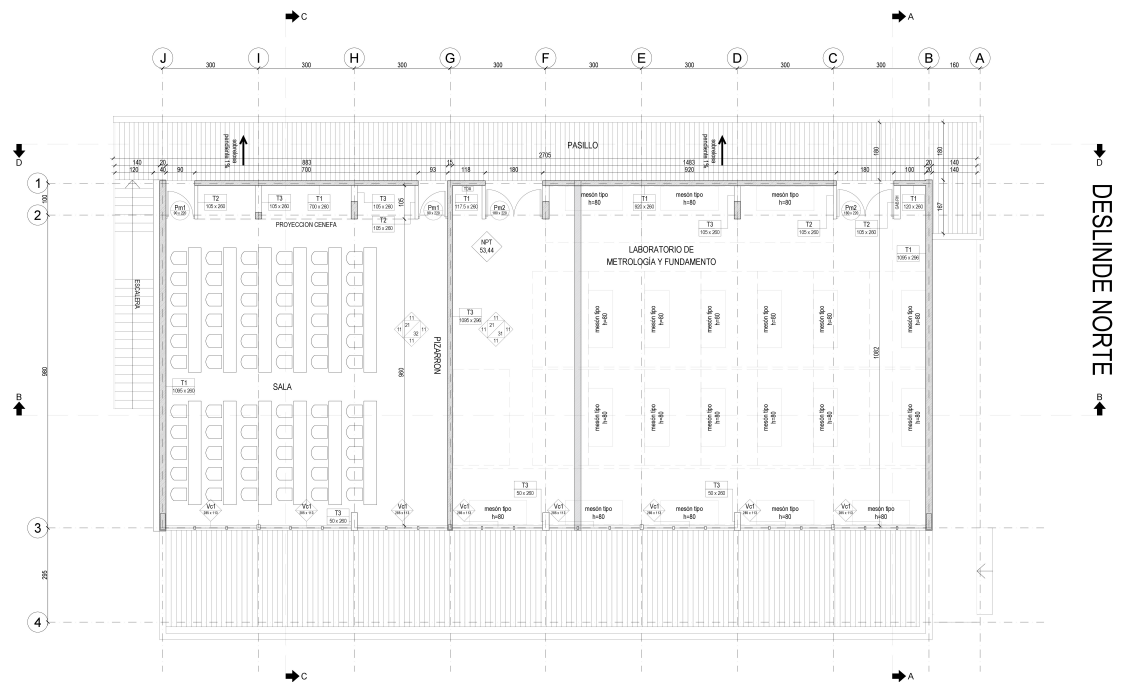


Figura B.1: Plano vista superior planta alta del edificio

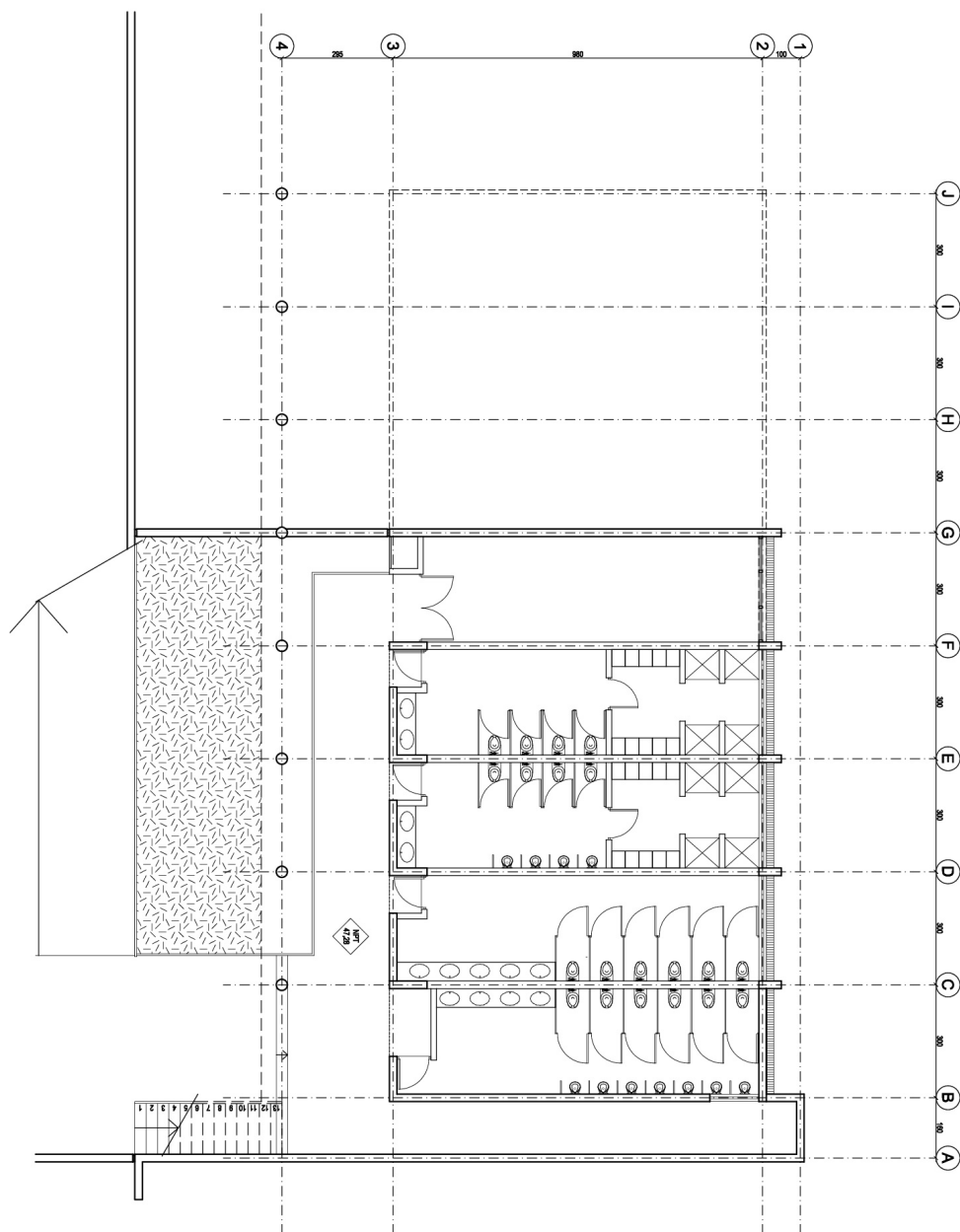


Figura B.3: Plano vista superior subterráneo del edificio

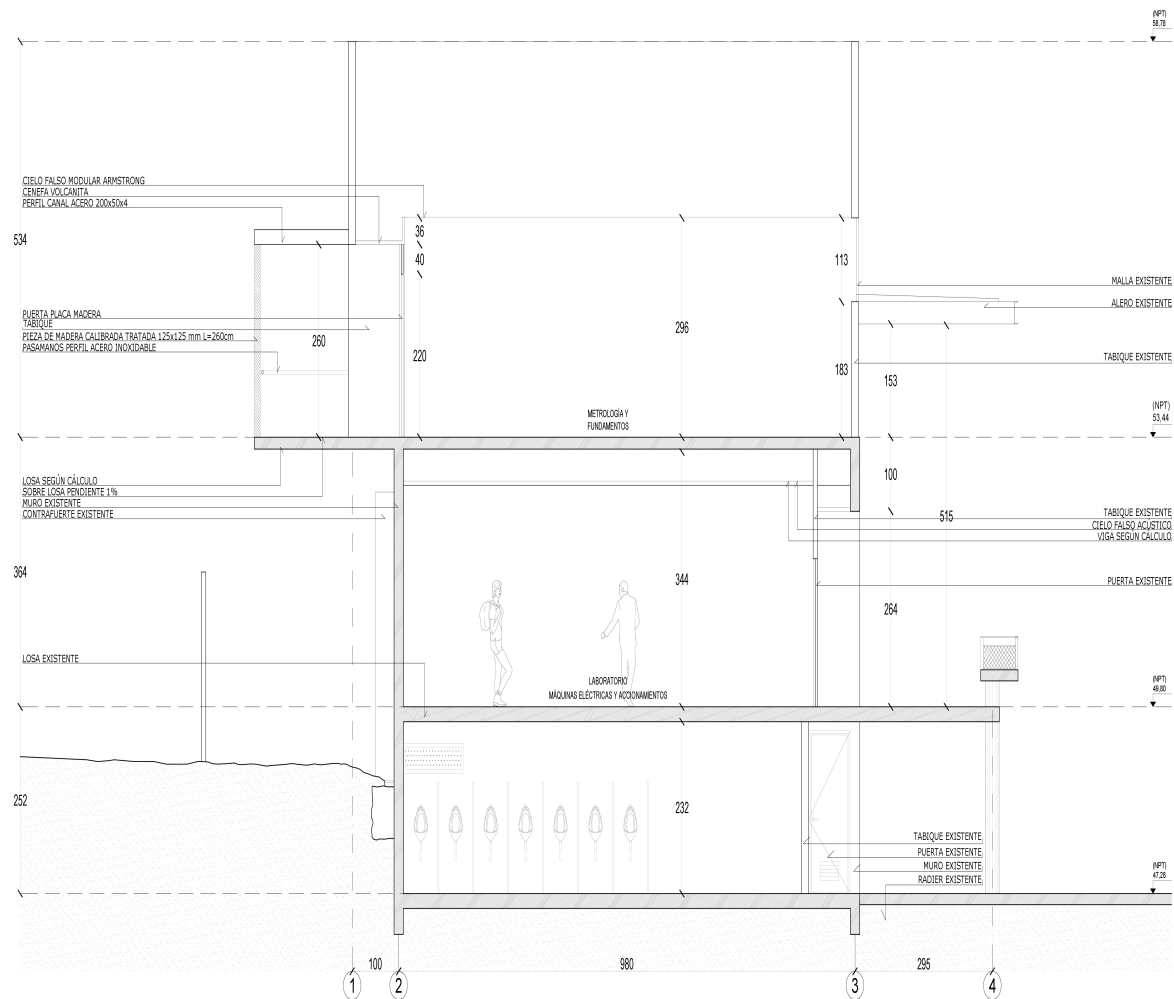


Figura B.4: Edificio vista en corte

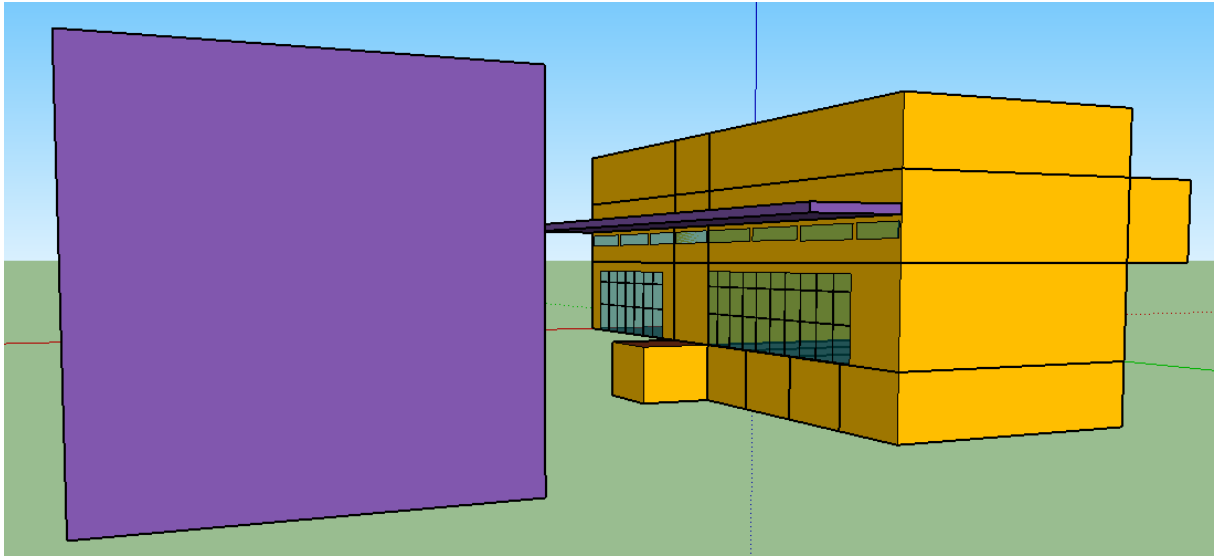


Figura B.5: Edificio con elementos de sombreamiento

Anexo C

Perfil de carga térmica y consumo eléctrico mensual

Tabla C.1: Carga térmica mensual en [kWh] para diferentes temperaturas de consigna.

	Heating 20 [°C]	Cooling 20 [°C]	Heating 22 [°C]	Cooling 22 [°C]	Heating 24[°C]	Cooling 24[°C]
Enero	0.00	162.42	0.00	154.67	0.00	114.82
Febrero	0.00	123.91	0.00	110.17	0.00	55.02
Marzo	0.00	85.50	0.00	62.81	0.00	6.89
Abril	0.00	7.34	0.00	0.42	0.00	0.00
Mayo	128.37	0.00	154.42	0.00	159.53	0.00
Junio	177.17	0.00	202.01	0.00	205.29	0.00
Julio	171.04	0.00	185.32	0.00	190.00	0.00
Agosto	133.67	0.00	167.73	0.00	186.38	0.00
Septiembre	15.84	6.44	20.00	0.57	23.88	0.00
Octubre	0.00	45.18	0.00	24.91	0.00	3.96
Noviembre	0.00	97.80	0.00	79.10	0.00	52.72
Diciembre	0.00	27.44	0.00	27.35	0.00	23.07

Tabla C.2: Consumo eléctrico y potencial de generación en [kWh] durante un año típico para distintas temperaturas de consigna

	PV [kWh]	Wind [kWh]	Heating 20 [°C]	Cooling 20 [°C]	Heating 22 [°C]	Cooling 22 [°C]	Heating 24[°C]	Cooling 24[°C]
Enero	92.42	237.18	0.00	389.94	0.00	330.13	0.00	194.86
Febrero	86.87	277.20	0.00	372.94	0.00	264.45	0.00	92.63
Marzo	76.39	237.51	0.00	308.97	0.00	169.34	0.00	12.53
Abril	63.39	234.21	0.47	34.82	0.47	1.24	0.47	0.00
Mayo	45.87	174.46	234.98	0.00	314.61	0.00	349.46	0.00
Junio	34.96	158.11	308.41	0.00	366.27	0.00	373.25	0.00
Julio	35.07	148.69	306.17	0.00	336.91	0.00	351.75	0.00
Agosto	52.95	179.71	229.91	0.00	306.64	0.00	356.38	0.00
Septiembre	47.27	250.83	26.90	36.68	34.28	4.91	44.65	0.00
Octubre	74.03	302.08	0.00	204.65	0.00	73.99	0.00	6.31
Noviembre	86.78	285.68	0.00	298.49	0.00	179.58	0.00	91.62
Diciembre	105.07	315.07	0.00	379.38	0.00	322.82	0.00	204.97