

2019-03-24

# DISEÑO Y SIMULACIÓN DE ESTRATEGIA DE GESTIÓN DE ENERGÍA PARA NANO REDES CONSIDERANDO EL MODELO TÉRMICO Y SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN EN INSTALACIONES

MORALES AMPUERO, RODRIGO ALEJANDRO

---

<https://hdl.handle.net/11673/49409>

*Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA*



# Diseño y simulación de estrategia de gestión de energía para nano redes considerando el modelo térmico y sistema de climatización en instalaciones

---

Rodrigo Alejandro Morales Ampuero

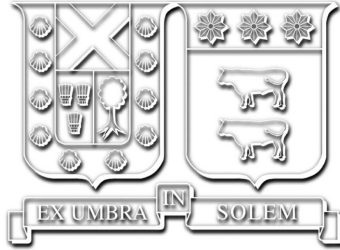
---

2019

Memoria de titulación para optar al título de:  
Ingeniero Civil Electricista

Profesores Guía:  
Dr. Antonio Sánchez Squella (UTFSM)  
Dr. Rodrigo Barraza (UTFSM)

Santiago, 24 de Marzo del 2019.



# Diseño y simulación de estrategia de gestión de energía para nano redes considerando el modelo térmico y sistema de climatización en instalaciones

---

Rodrigo Alejandro Morales Ampuero

---

2019

*Serás capaz de todo si sabes aceptar que te has equivocado, y sin desfallecer vuelves a  
empezar desde el principio.*  
— *Rudyard Kipling*

# Agradecimientos

Primero que todo agradecer a mi familia por su apoyo incondicional, por ser la motivación y el pilar de mi esfuerzo ante todo. Agradecimientos a mi madre que siempre estuvo presente para calmarme ante la frustración, y para darme la palabra de ánimo que necesitaba. Agradecimientos también a mi padre, quien pudo darme una educación desde pequeño y me enseñó que, sin duda, esta es la lotería que todos necesitamos ganar en la vida.

Ciertamente el camino recorrido fue largo, sin embargo se tornó mucho más grato gracias a buenos amigos y compañeros como H.H. que me acompañó desde mi primer día de universidad. También debo mencionar a mis amigos y compañeros de estudio, N.F., V.P. Y J.D., a quienes les deseo lo mejor en su futuro profesional.

Quiero darles un agradecimiento particular a los académicos de la universidad, por traspasar sus conocimientos, enseñar y preparar a sus alumnos con dedicación y entrega. A mis profesores guías por apoyarme en esta investigación y estar dedicadamente presentes para ayudarme a resolver todas mis dudas, direccionando este trabajo hacia el camino más sabio.

Por último, un agradecimiento especial para todas las personas que me acompañaron en este proceso, que me dieron apoyo y fuerza cuando lo necesitaba, personas que hoy ya no me acompañan en este camino pero sin duda dejaron su huella en mí y cuyas enseñanzas guardo y aplico día a día. y personas que llegaron en esta etapa final y que seguramente me enseñaran cosas nuevas y me acompañaran en lo que sigue después de esta etapa de mi vida.

# Resumen

En este trabajo se desarrolla un algoritmo de gestión de energía para un pequeño sistema electrotérmico (nano red), que considera medición inteligente, recursos de generación distribuida (DER) y almacenamiento energético, a través de un control supervisor que regula la temperatura al interior de una habitación por acción de un HVAC (Heating/Ventilating/Air Conditioning). El principal objetivo del control supervisor es permitir niveles de confort de temperatura para las personas que interactúen dentro de la habitación. En segundo lugar, evaluará la disminución de costos energéticos, por acción controlada del HVAC y la capacidad de tener almacenamiento energético.

En el estudio se considera una habitación de  $3,0 \times 10,6 \times 2,6$  [m] con medición de temperatura y control térmico por acondicionamiento del aire, perteneciente a un establecimiento ubicado en Santiago de Chile, con conexión a la red local y que incorpora en su tejado una planta de generación fotovoltaica y un aerogenerador trabajando en paralelo. Además cuenta con una estación meteorológica externa que permite el análisis predictivo de la temperatura al interior del establecimiento.

El sistema eléctrico tiene la posibilidad de desconectarse de la red local, funcionando de forma independiente (islanding) y con regulación de tensión ejecutada por el sistema de generación fotovoltaico. Adicionalmente el sistema posee un banco de baterías que permite la gestión de energía por el control supervisor.

Bajo este escenario, un conjunto de estrategias de coordinación y control de supervisión, adaptadas a las necesidades definidas en el programa de gestión energética y las condiciones de infraestructura de la red y del establecimiento, son aplicadas con el objetivo de gestionar eficientemente la oferta y el consumo de energía, considerando la Ley 20.571 y actual Ley 21.118, la tarifa eléctrica instaurada con la empresa de distribución y la opción de incorporar un sistema de almacenamiento energético y control de temperatura al interior de la habitación. Por otra parte, estos sistemas pueden ser vistos y se acercan a un sistema socio-técnico complejo, en el que los usuarios de energía deben desempeñar un papel crucial como *cargas activas*, capaces de responder y adaptarse a las necesidades de la nano red.

La estrategia del control supervisor es diseñada en base al control homeostático, presente en todos los organismos vivos, e incorpora algoritmos de control tanto reactivos como predictivos, de manera que el sistema sea más inteligente en su operación y a la vez eficiente en términos de establecer y mantener un equilibrio homeostático entre la generación y los consumos. Los algoritmos que representan la estrategia de control homeostático son simulados en MATLAB, bajo el perfil tarifario AT 4.3.

Los estudios realizados permiten definir la lógica de control necesaria para obtener 100 % de confort térmico al interior de la habitación, además de disminuir los costos de operación actuales de la nano red y optimizar el uso del sistema HVAC interno. También se logra determinar la ecuación dinámica que modela el comportamiento térmico de la habitación para pequeños intervalos temporales, demarcados por el uso del sistema HVAC.

# Abstract

This work develops an energy management algorithm for a small electrothermal system (nano network), which considers intelligent metering, distributed generation resources (DER) and energy storage, through a supervisory control that regulates the temperature inside a room by the action of an HVAC (Heating/Ventilating/Air Conditioning). The main objective of supervisory control is to allow temperature comfort levels for people interacting inside the room. Secondly, it will evaluate the decrease in energy costs, by controlled action of the HVAC and the ability to have energy storage.

The study considers a room of  $3,0 \times 10,6 \times 2,6$  [m] with temperature measurement and thermal control by air conditioning, belonging to an establishment located in Santiago de Chile, with connection to the local network and that incorporates in its roof a photovoltaic generation plant and a wind turbine working in parallel. It also has an external weather station that allows predictive analysis of the temperature inside the establishment.

The electrical system can be disconnected from the local network, working independently (islanding) and with voltage regulation executed by the photovoltaic generation system. Additionally, the system has a battery bank that allows energy management by supervisory control.

Under this scenario, a set of coordination and supervisory control strategies, adapted to the needs defined in the energy management program and the infrastructure conditions of the network and establishment, are applied with the aim of efficiently managing the supply and consumption of energy, considering Law 20.571 and Law 21.118, the electricity tariff established with the distribution company and the option of incorporating an energy storage system and temperature control inside the room. On the other hand, these systems can be seen and come close to a complex socio-technical system, in which energy users must play a crucial role as *active loads*, able to respond and adapt to the needs of the nano network.

The supervisory control strategy is designed on the basis of homeostatic control, present in all living organisms, and incorporates both reactive and predictive control algorithms, so that the system is more intelligent in its operation and at the same time efficient in terms of establishing and maintaining a homeostatic balance between generation and consumption. The algorithms representing the homeostatic control strategy are simulated in MATLAB, under the tariff profile AT 4.3.

The studies carried out make it possible to define the control logic needed to obtain 100 % of thermal comfort inside the room, in addition to reducing the current operating costs of the nano network and optimizing the use of the internal HVAC system. It is also possible to determine the dynamic equation that models the thermal behavior of the room for small time intervals, demarcated by the use of the HVAC system.

# Glosario

<b>DER</b>	: Distributed Energy Resources.
<b>HVAC</b>	: Heating/Ventilating/Air Conditioning.
<b>ESS</b>	: Energy Storage System.
<b>DR</b>	: Demand Response.
<b>EMS</b>	: Energy Management System.
<b>PCC</b>	: Point of Common Coupling.
<b>DG</b>	: Distributed Generation.
<b>ERNC</b>	: Energías Renovables No Convencionales.
<b>SES</b>	: Sistema de Energía Sostenible.
<b>HR</b>	: Homeostasis Reactiva.
<b>HP</b>	: Homeostasis Predictiva.
<b>MPPT</b>	: Maximum Power Point Tracking.
<b>MPP</b>	: Maximum Power Point.
<b>DC</b>	: Direct Current.
<b>AC</b>	: Alternating Current.
<b>SOC</b>	: State Of Charge.
<b>CLP</b>	: Peso Chileno.
<b>ASHRAE</b>	: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.



# Índice de Contenidos

<b>Resumen</b>	<b>I</b>
<b>Abstract</b>	<b>II</b>
<b>Glosario</b>	<b>III</b>
<b>Índice de Contenidos</b>	<b>IV</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>VII</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>X</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos de la Memoria . . . . .	3
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>4</b>
2.1. Tendencias de control de micro redes . . . . .	4
2.1.1. Control jerárquico en micro redes . . . . .	6
2.1.1.a. Control primario . . . . .	7
2.1.1.b. Control secundario . . . . .	7
2.1.1.c. Control terciario . . . . .	7
2.1.2. Arquitectura de los EMS . . . . .	7
2.1.2.a. Arquitecturas centralizadas . . . . .	8
2.1.2.b. Arquitecturas descentralizadas . . . . .	8
2.2. Modelados térmicos en edificios . . . . .	9
2.2.1. Método estadístico . . . . .	10
2.2.2. Método ingenieril . . . . .	10
2.2.2.a. Modelo CFD . . . . .	11
2.2.2.b. Modelo zonal . . . . .	11
2.2.2.c. Modelo multizona o nodal . . . . .	11
2.2.3. Método híbrido . . . . .	12
2.3. Homeostasis Reactiva y Predictiva . . . . .	12
<b>3. Metodología de Medición y Obtención de Datos</b>	<b>14</b>
3.1. Parámetros de interés . . . . .	14
3.2. Equipos de medición y registro de datos . . . . .	15
3.2.1. Medición de parámetros para HR . . . . .	16
3.2.1.a. Temperatura interna del aire y humedad relativa . . . . .	16
3.2.1.b. Consumo eléctrico de la zona . . . . .	18

3.2.2.	Medición de parámetros para HP . . . . .	19
3.2.2.a.	Temperatura del aire y humedad relativa exterior . . . . .	19
3.2.2.b.	Radiación global horizontal . . . . .	20
3.2.2.c.	Velocidad del viento . . . . .	21
3.2.3.	Errores Instrumentales . . . . .	21
3.3.	Parámetros requeridos en implementación . . . . .	21
3.4.	Días de estudio y medición para simulación de nano red . . . . .	22
<b>4.</b>	<b>Modelado del Sistema</b>	<b>24</b>
4.1.	Entorno de simulación . . . . .	24
4.2.	Esquema general nano red . . . . .	26
4.3.	Modelo sistema DER . . . . .	27
4.3.1.	Generación solar . . . . .	29
4.3.2.	Generación eólica . . . . .	32
4.4.	Modelo de las cargas eléctricas (Loads) . . . . .	36
4.5.	Modelo ESS . . . . .	37
4.6.	Modelo PCC . . . . .	41
4.7.	Modelo Térmico HVAC . . . . .	41
4.8.	Modelo EMS . . . . .	46
4.9.	Modelo general de la nano red - Homeostasis Reactiva . . . . .	50
4.10.	Modelo general de la nano red - Homeostasis Predictiva . . . . .	53
<b>5.</b>	<b>Caso de Estudio y Técnicas de Análisis</b>	<b>55</b>
5.1.	Sistema tarifario . . . . .	55
5.1.1.	Bloques tarifarios . . . . .	56
5.2.	Confort térmico . . . . .	57
5.3.	Casos de estudio . . . . .	57
5.3.1.	CASO 1 - Caso Base . . . . .	58
5.3.2.	CASO 2 - Predicción pre horario laboral . . . . .	58
5.3.3.	CASO 3 - Predicción pre aumento tarifario . . . . .	58
5.3.4.	CASO 4 - Uso de ESS para disminución de costos . . . . .	59
5.3.5.	CASO 5 - Contingencias en la red de distribución . . . . .	59
<b>6.</b>	<b>Simulaciones y Análisis</b>	<b>60</b>
6.1.	CASO 1 - Caso Base . . . . .	60
6.1.1.	Semana Verano . . . . .	60
6.1.2.	Semana Invierno . . . . .	62
6.1.3.	Análisis entre semanas . . . . .	64
6.1.4.	Día base de operación 13/02/2018 . . . . .	65
6.2.	CASO 2 - Predicción pre horario laboral . . . . .	68
6.2.1.	Día 13/02/2018 usando datos de App Meteorológica . . . . .	68
6.2.2.	Día 13/02/2018 usando datos de Base de Datos . . . . .	69
6.2.3.	Evaluación de la mejora . . . . .	69
6.3.	CASO 3 - Predicción pre aumento tarifario . . . . .	70
6.3.1.	Contienda de temperatura 24,5 °C al inicio del bloque tarifario <i>punta</i> . . . . .	70
6.3.2.	Contienda de temperatura 24,2 °C al inicio del bloque tarifario <i>punta</i> . . . . .	71
6.3.3.	Comparación entre escenarios y evaluación de la mejora . . . . .	71
6.4.	CASO 4 - Uso de ESS para disminución de costos . . . . .	72

6.4.1.	Día 13/02/2018 usando ESS para disminución de costos . . . . .	72
6.4.2.	Semana Verano usando ESS para disminución de costos . . . . .	74
6.4.3.	Semana Invierno usando ESS para disminución de costos . . . . .	75
6.4.4.	Evaluación de la mejora . . . . .	77
6.5.	CASO 5 - Contingencias en la red de distribución . . . . .	77
6.5.1.	Día 13/02/2018 con contingencias en red de distribución . . . . .	78
6.5.2.	Evaluación de la operación del algoritmo de control . . . . .	79
6.6.	Cuadro Resumen . . . . .	80
6.7.	Casos Extra . . . . .	81
6.7.1.	Rango límite para asegurar confort térmico . . . . .	81
6.7.2.	Almacenamiento térmico . . . . .	82
<b>7.</b>	<b>Conclusiones y Comentarios Finales</b>	<b>85</b>
7.1.	Conclusiones . . . . .	85
7.2.	Comentarios Finales . . . . .	87
<b>A.</b>	<b>Instrumentos de Medición</b>	<b>89</b>
<b>B.</b>	<b>Mediciones y Data</b>	<b>98</b>
<b>C.</b>	<b>Códigos en Matlab</b>	<b>103</b>
<b>D.</b>	<b>Resultados Anexos</b>	<b>116</b>
D.1.	CASO 2 . . . . .	116
D.2.	CASO 3 . . . . .	119
	<b>Bibliografía</b>	<b>122</b>

# Índice de Figuras

1.1.	Diagrama conceptual de una nano red. [4]	2
2.1.	Esquema general de una micro-red con multiples DER. [8]	5
2.2.	Niveles jerárquicos de control: control primario, control secundario, control terciario. [8]	6
2.3.	Diagrama general de control centralizado. [7]	8
2.4.	Diagrama general de control descentralizado. [7]	9
2.5.	Clasificación de modelos de estimación de costos por calefacción. [16]	10
3.1.	Ubicación de la nano red por imagen satelital.	15
3.2.	Edificio de estudio (a) y zona especifica (b). Modelo TRNSYS.	16
3.3.	Puntos de medición en zona de estudio. Modelo TRNSYS.	17
3.4.	Punta de medición de temperatura de pared.	17
3.5.	Montaje para medición de estratificación térmica en la habitación.	18
3.6.	Analizador de redes FLUKE 1735.	18
3.7.	Tablero con medición en interruptores de la zona de estudio.	19
3.8.	Piranómetros instalados en el techo del edificio.	20
3.9.	Amplificador de señal para voltaje.	21
4.1.	Diagrama de nano red en SIMULINK.	25
4.2.	Diagrama de modelo térmico de la zona de estudio. [16]	26
4.3.	Esquema general de la nano red de estudio. Elaboración propia.	27
4.4.	Placas y aerogenerador instalados en la nano red.	28
4.5.	Resumen de ganancia DER.	29
4.6.	Circuito equivalente de un panel solar.	29
4.7.	Esquema del arreglo fotovoltaico para la obtención del MPP. Elaboración propia.	31
4.8.	Gráfico de potencia vs radiación para distintos valores de temperatura.	32
4.9.	Gráfico de potencia vs tiempo del día en segundos de la generación solar.	32
4.10.	Comportamiento del viento frente a un aerogenerador.	33
4.11.	Potencia del viento.	34
4.12.	Gráfico de potencia vs velocidad del viento para el aerogenerador.	35
4.13.	Gráfico de potencia vs tiempo del día en segundos de la generación eólica.	35
4.14.	Consumo de las cargas en un día habil de operación.	36
4.15.	Baterías instaladas en la nano red.	37
4.16.	Circuito equivalente de la batería según modelo en SIMULINK. [35]	37
4.17.	Curva de carga de batería marca Curtiss Technologies.	39
4.18.	Simulación en SIMULINK del conjunto de baterías del ESS.	40
4.19.	Comportamiento de señales en sub sistema Backup.	40

4.20.	Comportamiento de señales en sub sistema Storage. . . . .	41
4.21.	Análisis de sensibilidad de la temperatura de la zona con respecto a las variables ambientales. [16] . . . . .	42
4.22.	Comportamiento de las temperaturas externa e interna sin uso del sistema HVAC. . . . .	43
4.23.	Comportamiento de las temperaturas externa e interna con uso del sistema HVAC. . . . .	43
4.24.	Esquema representativo del Tiempo de Retraso y el Factor de Decremento. [39] . . . . .	44
4.25.	Transferencia de calor unidimensional. [39] . . . . .	45
4.26.	Carga y descarga térmica en nodo de estudio. . . . .	45
4.27.	Esquema general de monitoreo y operación de interruptores en nano red. . . . .	46
4.28.	Proceso térmico y eléctrico al interior de la nano red. . . . .	47
4.29.	Esquema de control homeostático del EMS. . . . .	48
4.30.	Sistema de bloques <i>General System</i> . . . . .	50
4.31.	Sistema de bloques <i>Inputs</i> . . . . .	51
4.32.	Sistema de bloques <i>General System Control</i> . . . . .	51
4.33.	Flujo de potencia en la nano red para el día 13/02/2018. . . . .	52
4.34.	Carga de las baterías. . . . .	52
5.1.	Estructura tarifaria de los cargos por suministro de energía. [37] . . . . .	56
5.2.	Tarifas de Diciembre de 2018 presentadas por Enel Distribución Chile. [37] . . . . .	56
6.1.	Flujo de potencia semana de verano CASO 1. . . . .	61
6.2.	Comportamiento de temperaturas y uso de sistema HVAC semana de verano CASO 1. . . . .	61
6.3.	Estado de carga del ESS semana de verano CASO 1. . . . .	62
6.4.	Flujo de potencia semana de invierno CASO 1. . . . .	63
6.5.	Comportamiento de temperaturas y uso de sistema HVAC semana de invierno CASO 1. . . . .	63
6.6.	Estado de carga del ESS semana de invierno CASO 1. . . . .	64
6.7.	Comportamiento de temperaturas sin uso del sistema HVAC 13/02/2018. . . . .	66
6.8.	Flujo de potencia 13/02/2018 CASO 1. . . . .	66
6.9.	Comportamiento de temperaturas y uso de sistema HVAC 13/02/2018 CASO 1. . . . .	67
6.10.	Estado de carga del ESS 13/02/2018 CASO 1. . . . .	67
6.11.	Comportamiento de temperaturas y uso de sistema HVAC 13/02/2018 CASO 3 exigiendo temperatura de 24,5 °C. . . . .	70
6.12.	Comportamiento de temperaturas y uso de sistema HVAC 13/02/2018 CASO 3 exigiendo temperatura de 24,2 °C. . . . .	71
6.13.	Flujo de potencia 13/02/2018 CASO 4. . . . .	73
6.14.	Comportamiento de temperaturas y uso de sistema HVAC 13/02/2018 CASO 4. . . . .	73
6.15.	Estado de carga del ESS 13/02/2018 CASO 4. . . . .	74
6.16.	Flujo de potencia semana de verano CASO 4. . . . .	74
6.17.	Comportamiento de temperaturas y uso de sistema HVAC semana de verano CASO 4. . . . .	75
6.18.	Estado de carga del ESS semana de verano CASO 4. . . . .	75

6.19.	Flujo de potencia semana de invierno CASO 4. . . . .	76
6.20.	Comportamiento de temperaturas y uso de sistema HVAC semana de invierno CASO 4. . . . .	76
6.21.	Estado de carga del ESS semana de invierno CASO 4. . . . .	77
6.22.	Flujo de potencia 13/02/2018 CASO 5. . . . .	78
6.23.	Comportamiento de temperaturas y uso de sistema HVAC 13/02/2018 CASO 5. . . . .	79
6.24.	Estado de carga del ESS 13/02/2018 CASO 5. . . . .	79
6.25.	Flujos de calor de convección, conducción y radiación, en una zona $i$ . . .	82
6.26.	Circuito RC en serie. . . . .	84
A.1.	Transmisor para riel DIN utilizado para conexión PT100. . . . .	89
A.2.	Datasheet sensor de humedad y temperatura. . . . .	90
A.3.	Datasheet sensor de humedad Tinytag. . . . .	91
A.4.	Datasheet sensor de temperatura Tinytag. . . . .	92
A.5.	Datasheets piranómetros CMP Kipp & Zonen. . . . .	93
A.6.	Analizador de redes FLUKE 1735. . . . .	94
A.7.	Datasheet paneles fotovoltaicos 320W, Jiangyin Hareon Power. . . . .	95
A.8.	Datasheet equipo aerogenerador 1500W, Hissuma Solar. . . . .	96
A.9.	Datasheet baterías Curtiss Technologies. . . . .	97
D.1.	Flujo de potencia 13/02/2018 CASO 2 App Meteorológica. . . . .	116
D.2.	Comportamiento de temperaturas y uso de sistema HVAC 13/02/2018 CASO 2 App Meteorológica. . . . .	117
D.3.	Estado de carga del ESS 13/02/2018 CASO 2 App Meteorológica. . . . .	117
D.4.	Flujo de potencia 13/02/2018 CASO 2 Base de Datos. . . . .	118
D.5.	Comportamiento de temperaturas y uso de sistema HVAC 13/02/2018 CASO 2 Base de Datos. . . . .	118
D.6.	Estado de carga del ESS 13/02/2018 CASO 2 Base de Datos. . . . .	119
D.7.	Flujo de potencia 13/02/2018 CASO 3 exigiendo temperatura 24,5 °C. . . . .	119
D.8.	Estado de carga del ESS 13/02/2018 CASO 3 exigiendo temperatura 24,5 °C. . . . .	120
D.9.	Flujo de potencia 13/02/2018 CASO 3 exigiendo temperatura 24,2 °C. . . . .	120
D.10.	Estado de carga del ESS 13/02/2018 CASO 3 exigiendo temperatura 24,2 °C. . . . .	121

# Índice de Tablas

3.1.	Sensibilidad de los piranómetros. . . . .	20
3.2.	Resumen de errores instrumentales utilizados. . . . .	21
3.3.	Resumen de errores instrumentales utilizados. . . . .	22
6.1.	Resumen de resultados para los CASOS 1, 2 y 3. . . . .	80
6.2.	Resumen de resultados para los CASOS 4 y 5. . . . .	81
B.1.	Temperatura externa y radiación solar medidas en zona de estudio en periodo de verano. . . . .	98
B.2.	Temperatura externa y radiación solar medidas en zona de estudio en periodo de invierno. . . . .	99
B.3.	Velocidad del viento medida y parámetros extraídos del explorador solar. . . . .	100
B.4.	Consumo de cargas en zona de estudio. . . . .	101
B.5.	Tiempo de respuesta desde el encendido del equipo HVAC hasta alcanzar consigna de 20 [°C]. . . . .	102

# Capítulo 1

## Introducción

En la actualidad, el mundo se ve fuertemente influenciado por una crisis ecológica que ha llamado a grandes líderes mundiales a fomentar distintos mecanismos de disminución en el aporte de contaminación al medio ambiente, con medidas tales como la disminución de partículas de CO<sub>2</sub> que son liberadas a la atmósfera desde unidades de generación por combustibles fósiles, entre otras. Bajo este marco, Chile ha fomentado la inserción de ERNC para pequeños generadores, aprobando la Ley Net Billing (Ley 20.571 [1] y actual Ley 21.118 [2]), la cual permite a los consumidores locales tener su propio sistema de generación capaz de aportar a la red local y recibir pagos a nivel de nudo por parte de la distribuidora por la energía ( $kWh$ ) aportada a la red. De esta manera, el aporte de energía por combustibles fósiles ha ido disminuyendo, siendo en el primer semestre del 2018 un 17,8% del mercado de la generación en Chile en base a tecnología ERNC [3].

La inserción de nuevos medios de generación, a su vez, trae consigo nuevas problemáticas en temas de estabilidad energética para los sistemas eléctricos en general. Una de las líneas de investigación más fuertes es el uso de baterías u otros medios de almacenamiento energético (ESS), con el fin de distribuir la energía generada desde fuentes no convencionales a lo largo del día o almacenándola para labores específicas, evitando así la pérdida de energía en horas de sol o fuertes vientos según el tipo de sistema de generación. Claramente, los ESS también poseen sus propias restricciones y dinámicas de trabajo, que vuelven al sistema eléctrico cada vez más complejo al momento de operar.

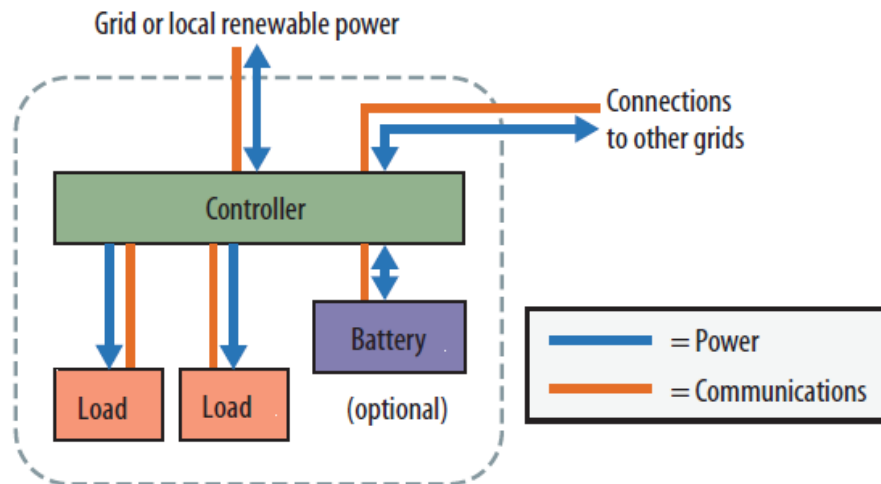
Por otra parte, el constante crecimiento demográfico e industrial implica que la demanda de energía necesaria para satisfacer las necesidades de las comunidades se mantenga en un crecimiento constante, siendo en general las cargas térmicas y los HVAC de las instalaciones los equipos que conllevan un mayor consumo energético, lo cual incentiva el estudio y desarrollo de diferentes medidas de eficiencia energética para mejorar el sistema eléctrico.

El desafío actual, consiste en regular y gestionar de forma adecuada los nuevos sistemas de generación, con capacidad de adaptarse a los cambios de carga horarios (DR) y mantener el sistema eléctrico estable en todo momento. Uno de los métodos bajo investigación para enfrentar este desafío es el uso de micro y nano redes con medición inteligente y capacidad de gestionar la energía mediante la conjugación de pequeños sistemas, volviéndolos estables durante su operación y permitiendo independizarse de la red local (sistemas On/Off Grid). Esto da lugar a un sistema de comunicación mucho más sofisticado, que se basa en una red



extensa de participación entre subsistemas, creando así una red extensa de información.

Entre tales sistemas de comunicación, es posible encontrar las nano redes, cuyo funcionamiento corresponde a un tópico central del estudio de la presente memoria. Una nano red es un dominio único para voltaje, calidad, confiabilidad, precio y administración; Debe tener al menos una carga o sumidero de poder, y al menos una salida al exterior. Las fuentes de electricidad no son parte de la nano red. La Figura 1.1 ilustra la estructura de una nano red simple. Todos los flujos de poder son acompañados de comunicaciones ya sea por cable o inalámbricos.



**Figura 1.1:** Diagrama conceptual de una nano red. [4]

El algoritmo diseñado para la gestión interna de la energía será ejecutado por un control supervisor basado en el concepto de Homeostasis [5], esta última, consiste en una estrategia de control inspirada en la regulación homeostática que realizan todos los seres vivos, en la cual la fuente de alimentación y la demanda de energía (cargas) responden el uno al otro en forma cooperativa, con tal de conseguir un beneficio mutuo, esforzándose por mantener un estado estable, eficiente y de equilibrio autorregulado. Análogamente, el algoritmo de control construido permitirá coordinar las distintas cargas, operando de manera eficiente y de esa forma avanzar hacia un sistema de energía verdaderamente sostenible.

La nano red estará encargada de regular el consumo de potencia de una carga térmica variable (HVAC) y una carga fija al interior de una habitación. La carga térmica será modelada de manera tal que durante un periodo de trabajo en horario de oficina (10:00 a 20:00 horas del día) se mantenga una temperatura de confort al interior del recinto. De acuerdo a la normativa entregada por la American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), las temperaturas de confort térmico para el invierno se encuentran entre los  $21 - 23\text{ }^{\circ}\text{C}$ , mientras que en el verano oscilan entre los  $23,5 - 25,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  [6].

Por otra parte, la nano red estará compuesta por un sistema de generación constituido por energía solar fotovoltaica y energía eólica producto de la aerogeneración (DER de estudio). Además, estará conectada a un sistema de baterías que permitirán el almacenamiento eléctrico al interior del sistema (ESS de estudio), y también, existirá una suerte de almacenamiento térmico producto del control utilizado sobre el equipo HVAC, que permitirá variar la demanda instantánea ejercida por la carga térmica “desplazándola” en el

tiempo y manteniendo los niveles de confort al interior de la habitación.

En este contexto, se evaluará el funcionamiento de un sistema de control que permita conjugar la estabilidad energética con el mantenimiento de los niveles de confort al interior de la habitación, estudiando el comportamiento del almacenamiento térmico generado por el control ejercido sobre el equipo HVAC, al variar la función objetivo del algoritmo de gestión de energía implementado en el lugar.

## 1.1. Objetivos de la Memoria

El objetivo general de este trabajo consiste en desarrollar una estrategia de control capaz de gestionar la generación, el almacenamiento y el consumo de energía eléctrica en una nano red tomando en consideración la acumulación de energía térmica y sistemas de climatización en las instalaciones.

Los objetivos específicos corresponden a:

- Definir un modelo orientado al control del sistema electrotérmico de una nano red.
- Diseñar una estrategia de control que conjugue el sistema eléctrico y el modelo térmico de las instalaciones.
- Validar los resultados mediante simulación.
- Realizar estudio de costos basados en la tarificación actual del distribuidor eléctrico.

# Capítulo 2

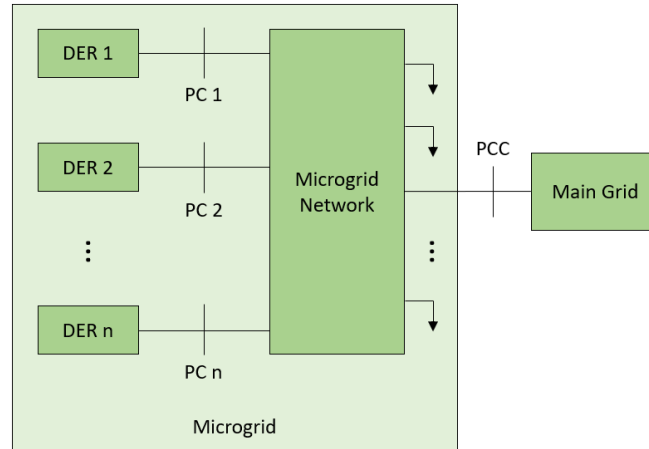
## Marco Teórico

### 2.1. Tendencias de control de micro redes

Con el propósito de integrar eficazmente los DER, se analizan distintos desafíos técnicos que evalúan la sustentabilidad y fiabilidad de los DER al momento de interactuar con la red, para no afectarla significativamente y lograr aprovechar los potenciales beneficios de la generación distribuida. En este sentido, se pueden observar una serie de problemáticas y posibilidades que incluyen [8]:

- Programación y despacho de unidades bajo la incertidumbre de la demanda, y la determinación adecuada de reserva.
- Operación confiable y económica de microrredes con un alto nivel de penetración de generación intermitente en modo de operación aislado de la red principal.
- Diseño de un apropiado esquema de gestión de demanda (DSM) para que los clientes reaccionen a las necesidades de la red.
- Diseño de nuevos modelos de mercado que permitan la participación competitiva de las fuentes de energías intermitentes y proporcionar apropiados incentivos para la inversión.
- Desarrollo de nuevas técnicas de control de frecuencia y tensión para tener en cuenta el aumento de la generación distribuida de energía.
- Desarrollar mecanismos de mercado y control que exhiban una característica plug-and-play para permitir una integración perfecta con el tiempo.

El concepto de micro red sirve como una alternativa para superar estos desafíos al incluir smart metering (medición inteligente) y sistemas de operación con relés, para lograr la correcta integración de las unidades DER y cargas variables. Una micro red puede ser descrita como un cluster de cargas y sistemas ESS, en interconexión a varios DERs, operados en coordinación para suministrar de forma fiable la electricidad a cargo de un sistema de gestión de energía (EMS), y conectados al sistema de alimentación local a nivel de distribución en un solo punto de conexión denominado PCC (Figura 2.1).



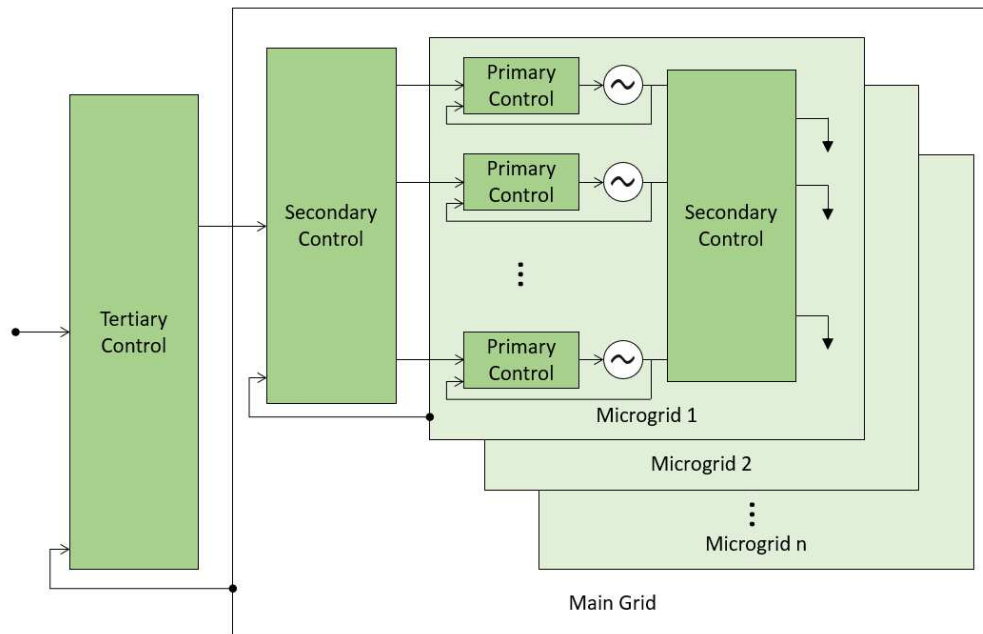
**Figura 2.1:** Esquema general de una micro-red con múltiples DER. [8]

La adopción de micro redes permitirá resolver los problemas técnicos de una manera descentralizada, lo que reduce la necesidad de una coordinación central muy ramificada y compleja, pero requerirá la participación activa de cada micro red dentro de un sistema eléctrico local.

Las principales variables que se utilizan para controlar el funcionamiento de una micro red son tensión, frecuencia y la potencia activa y reactiva. En el modo conectado a la red, la frecuencia de la micro red y la tensión en el PCC son predominantemente determinadas por la red local. El papel principal del control de la micro red en este caso es acomodarse a la potencia activa y reactiva generada por las unidades de DER, y la demanda de carga. La inyección de potencia reactiva por una unidad de DER puede ser utilizada para corregir el factor de potencia, o de control de tensión en el correspondiente punto de conexión (PC). En este modo, la red local podría no permitir la regulación o el control de la tensión por unidades DER en la proximidad de la PCC para evitar la interacción con la misma funcionalidad proporcionada por la red [9].

En modo aislado de la red, la micro red opera como una entidad independiente. Este modo de operación es significativamente más desafiante que el modo conectado a la red, porque el equilibrio entre la oferta y la demanda requiere de la implementación de mecanismos precisos de reparto de carga para equilibrar los desajustes bruscos de potencia activa. El voltaje y la frecuencia de la micro red no son más aportados por la red local, por lo tanto deben ser controlados por las distintas unidades DER según el sistema DG que se posea.

En general, las estructuras de una micro red son lo suficientemente grandes como para administrar la energía de grandes centros de consumo como campus universitarios y hospitales. Cuando la estructura de una micro red se reduce para suplir los requisitos de una instalación más pequeña, como una casa residencial o un pequeño edificio, se le puede denominar específicamente como nano red [10].



**Figura 2.2:** Niveles jerárquicos de control: control primario, control secundario, control terciario. [8]

Una nano red es un caso particular de una micro red, su insinuación puede estar asociada a la potencia de un sistema, o bien, al número de equipos que interactúan en él. En particular, se denotará el concepto de nano red a un dominio único de voltaje (AC y DC), calidad, confiabilidad, precio y administración, que podrá gestionar únicamente el funcionamiento de las cargas y baterías, además de tener acción sobre el interruptor para conexión de la nano red a la red de distribución local. El diagrama que comprende la interacción de la nano red puede ser revisado en la Figura 1.1.

### 2.1.1. Control jerárquico en micro redes

Con respecto a la arquitectura del control de una Micro red, se identifica comúnmente un enfoque centralizado debido al tamaño y distribución del sistema del que se quiere ejercer control. La diferencia entre un sistema de control centralizado y uno descentralizado, radica en la capacidad de información que posee cada controlador local para realizar su labor y en la rapidez de comunicación que existe entre ellos para su coordinación. Pese a esta tendencia, no siempre es lo más conveniente implementar un sistema de control centralizado para lograr una mejor eficiencia y funcionamiento del sistema de control para una micro red.

El entorno de una micro red, está caracterizado por tener frecuentes y múltiples cambios en su topología; la robustez y la capacidad de adaptación de los controladores son rasgos deseados para el correcto funcionamiento del sistema de control. La disponibilidad de mediciones, la comunicación y las posibilidades de computación de altas velocidades son características fundamentales para todos los requisitos anteriores; por esta razón, se debe hacer un esfuerzo para reducir la necesidad de comunicaciones de alta velocidad y la computación en tareas críticas. La adopción alternativa de una estructura de control jerárquico puede resultar bastante interesante, dadas las diferentes constantes de tiempo

involucradas en el sistema, incluyendo las dinámicas rápidas en los controladores de salida y la dinámica más lenta en el despacho económico.

Como se observa en la Figura 2.2, en la estrategia de control jerárquico se distinguen tres niveles: primario, secundario y terciario, donde los niveles primario y secundario están asociados con el funcionamiento de la propia nano red, y el nivel terciario alude a la operación coordinada de la nano red y la red local. A continuación se describen los diferentes niveles del control jerárquico.

#### **2.1.1.a. Control primario**

El control primario, también conocido como control local o control interno, es el primer nivel de la jerarquía de control, que ofrece la respuesta más rápida ante perturbaciones en el sistema. Este control se basa exclusivamente en mediciones locales y no requiere comunicación. El control primario es el que se encarga de simular el comportamiento físico de las máquinas sincrónicas en los inversores de modo de mantener el sistema estable. Normalmente utiliza el método de estatismo que emula el comportamiento de las máquinas sincrónicas [11].

#### **2.1.1.b. Control secundario**

El control secundario, también conocido como EMS, es responsable de la operación confiable, segura y económica de la microrred en modo conectado o aislado de red. Esta tarea se transforma en un desafío para las micro redes aisladas con presencia de cargas y fuentes de energía altamente variables, donde la tasa de actualización del sistema, debido al comando de despacho de las unidades, debe ser lo suficientemente rápida para seguir los cambios bruscos producto de cargas y generación. Las desviaciones de tensión y frecuencia permanentes producidos por la acción del control primario también se restauran por el control secundario.

#### **2.1.1.c. Control terciario**

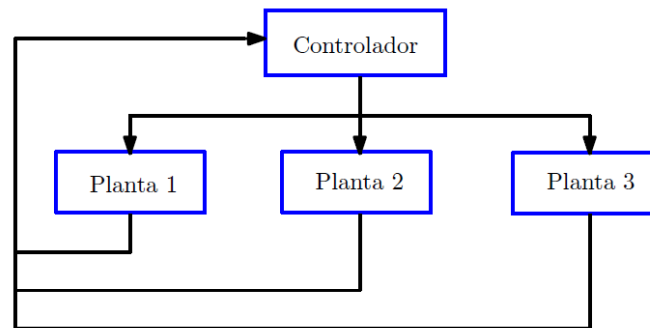
El control terciario es el nivel más alto de control y establece puntos de referencia a largo plazo y típicamente “óptimos” según los requisitos del sistema de alimentación de la red local. Desde el punto de vista de la comunicación, este control debe tener conexión directa o indirecta con múltiples micro redes que interactúan entre sí en el sistema, encargándose de coordinar su funcionamiento y de comunicar las necesidades y requisitos de la red local (soporte de tensión, regulación de frecuencia, etc.).

### **2.1.2. Arquitectura de los EMS**

Para la arquitectura de los EMS, se pueden identificar dos enfoques principales: Arquitecturas centralizadas y descentralizadas [9].

### 2.1.2.a. Arquitecturas centralizadas

El control centralizado es la forma más común de controlar sistemas de pequeña escala. Consiste en una retroalimentación de las salidas del sistema, a un punto en común encargado de controlar la micro red (EMS), tal como se presenta en el diagrama de la Figura 2.3. De esta forma la operación es ejecutada por el EMS sobre cada una de las plantas, definiendo su operación y ajuste. Las ventajas de esta arquitectura es que las decisiones se toman en base a toda la información del sistema, por lo que se llega a un sólo resultado producto del EMS. Sin embargo, también se presentan las siguientes desventajas, las que se amplifican a medida que el sistema crece [13]:



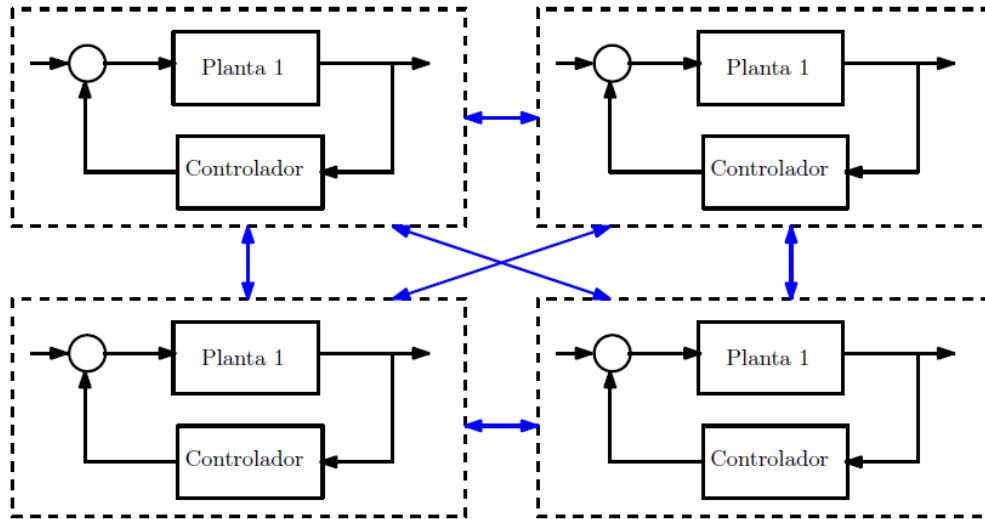
*Figura 2.3: Diagrama general de control centralizado. [7]*

- A medida que el sistema crece la cantidad de información que debe ser transmitida aumenta, lo que hace crecer considerablemente los requerimientos de comunicación en el sistema. Tal exceso de información en un solo punto, además, conlleva una mayor probabilidad de fallas en la red de comunicación, lo que disminuye los niveles de confiabilidad y susceptibilidad de la micro red.
- La implementación de este tipo de control requiere de sistemas computacionales con elevadas capacidades.
- La expansión del sistema no es sencilla ya que cada unidad nueva debe conectarse al controlador central.
- En el caso de pequeñas redes (micro o nano), el control centralizado en áreas con grandes distancias entre inversores es poco práctico y costoso, debido a que las señales tardan en llegar y requieren un gran ancho de banda [14].

### 2.1.2.b. Arquitecturas descentralizadas

El control descentralizado consiste en dividir el control del sistema en varios módulos o subprocesos, cada uno con su propio controlador independiente del resto, como se muestra en la Figura 2.4. Busca proporcionar la más alta autonomía para diferentes unidades DER y cargas, mientras intenta alcanzar un objetivo final, como es el control de frecuencia y voltaje en el caso de las micro redes, a partir de una red de comunicación e información entre unidades. De esta forma, el control distribuido permite evitar los problemas computacionales y de comunicación debido al control centralizado.

Sin embargo, la solución alcanzada no siempre es óptima y única, puesto que el óptimo de cada subsistema no necesariamente es el óptimo global, en algunos casos incluso se puede producir inestabilidad porque los subprocesos llegan a soluciones incompatibles [13].



*Figura 2.4: Diagrama general de control descentralizado. [7]*

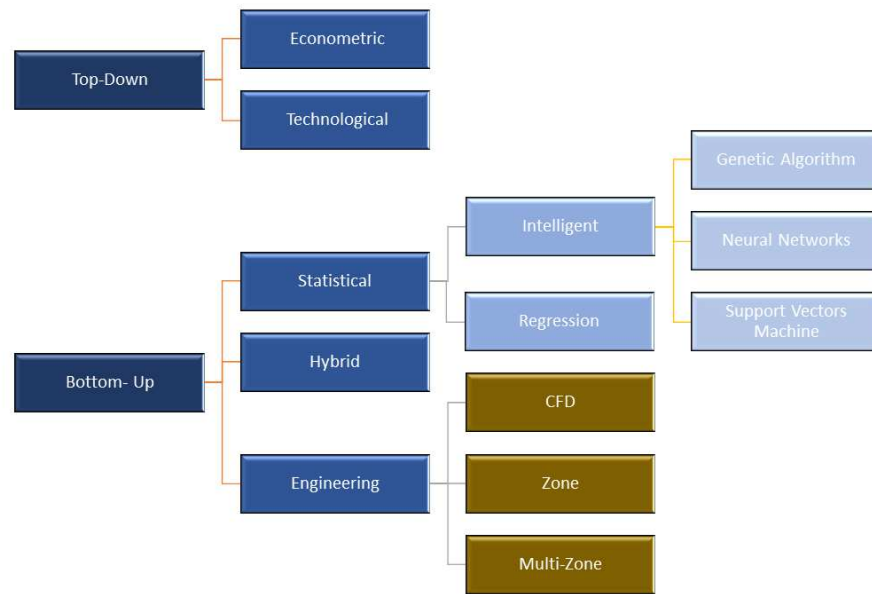
## 2.2. Modelados térmicos en edificios

El consumo energético de los edificios es un tópico altamente estudiado en la actualidad, sólo para dimensionar el nivel de importancia de su estudio, es posible mencionar que en Chile, el consumo de energía de los sectores Comercial, Público y Residencial representa alrededor de un 26,4 % del consumo a nivel nacional [15]. La necesidad de cuantificar las variaciones térmicas al interior de un edificio, ya sea por el confort de sus ocupantes o por la proyección de costos de utilización de equipos térmicos, encuentra una respuesta en los modelos térmicos de edificios.

Existe una gran variedad de modelos generados térmicos [17]. Un esquema general de los diferentes tipos de modelos utilizados para determinar el costo generado debido a la calefacción, es presentado en la Figura 2.5. En general, los modelos son clasificados según dos tipos de tipologías, denominadas como Top-Down y Bottom-Up.

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





**Figura 2.5:** Clasificación de modelos de estimación de costos por calefacción. [16]

En contraste, se encuentra la tipología Bottom-Up que abarca todos los modelos que ocupan datos de entradas a un nivel jerárquico menor al de un conjunto habitacional [18]. Por otra parte, no solo tiene como objetivo obtener el consumo de alguna edificación, sino también el uso final que se le da a esta energía.

En el marco de los modelos bajo la tipología Bottom-Up, se originan tres variantes de desarrollo:

### 2.2.1. Método estadístico

Este método incluye aquellos modelos que basan su análisis en el desarrollo de regresiones lineales simples o multivariantes, de data de largo plazo del consumo energético, usando correlaciones matemáticas con factores como la carga térmica y/o la temperatura ambiental [19].

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. Sus sub categorías tampoco serán foco de estudio dentro de la investigación.

### 2.2.2. Método ingenieril

El método ingenieril utiliza principios físicos para calcular el comportamiento termodinámico y energético de todo un edificio o componentes en sub niveles. Sus principales dificultades radican en la necesidad de información y detalle de los parámetros ambientales y de construcción en cada habitación del edificio [21]. Existen 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 [17].

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 procedimientos de verificaciones acreditados por Home Energy Rating System (HERS) Software Tools [22]. Por otro lado, se tiene la categoría calibrated la cual es validada por datos experimentales.

Dentro de esta categoría de métodos, se diferencian tres modelos diferentes. A continuación se procede a explicar los distintos modelos ingenieriles presentes en la literatura.

#### **2.2.2.a. Modelo CFD**

El método llamado dinámica de fluidos computacionales o por sus siglas en inglés (CFD), es un conjunto de métodos aplicados para obtener una solución aproximada a problemas de dinámicas de fluidos y transferencia de calor [23]. La manera en la cual se trabaja con la metodología CFD en edificios es discretizando las distintas zonas de un edificio para modelar el comportamiento termodinámico, en una gran cantidad de volúmenes de control que representan el interior de este, en los cuales se resuelven las ecuaciones de Navier-Stokes.

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

#### **2.2.2.b. Modelo zonal**

El método zonal se define como la división de la habitación en diferentes zonas. Esta metodología es un enfoque intermedio entre los enfoques CFD y Multizona o nodal que utiliza parámetros físicos de cada habitación. Constituye una herramienta que puede utilizarse para la investigación de confort térmico, calidad del aire y análisis energético.

En este método se asume en cada zona una condición homogénea, cada habitación es dividida en distintas zonas, a diferencia del método 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 se necesita información adicional con el fin de definir los distintos flujos presentes en el modelo físico; para esto, usualmente se utiliza un modelo CFD en estado estacionario, que permite alimentar las condiciones iniciales o de borde.

#### **2.2.2.c. Modelo 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, etc. Estos nodos generalmente representan una habitación o una pared. Estos modelos pueden llegar

a ser más específicos al incluir variables como cargas o generación (uso de las habitaciones, sistemas de aire acondicionado, sistemas DER, etc.) [24].

Las ecuaciones de transferencia de calor son resueltas para cada nodo, por lo cual es considerado un enfoque de una dimensión. Trnsys [25] es un ejemplo de programa comercial altamente utilizado en investigaciones con este método. Los procedimientos utilizados por estos métodos para la resolución de ecuaciones de transferencia de calor, debido a conducción, se basan principalmente en un análisis por analogía eléctrica [26]

### 2.2.3. Método híbrido

Este método, tal como su nombre lo indica, mezcla los métodos estadístico e ingenieril. Puede diseñar un modelo físico (ingenieril) para representar el edificio o el aire acondicionado, mientras que usa un modelo estadístico para obtener las variables clave [20].

## 2.3. Homeostasis Reactiva y Predictiva

La homeostasis es aquella condición en la cual el ambiente interno de un organismo vivo permanece relativamente constante, compensando los cambios en su entorno mediante el intercambio regulado de materia y energía con el exterior (metabolismo). Desde que se formuló, la homeostasis se ha centrado principalmente en la medicina y la biología, buscando curas para diferentes enfermedades gracias a su investigación basada en respuestas correctivas y cambios metabólicos, iniciados después de la perturbación del estado estacionario del organismo.

Entender el concepto de homeostasis es básico para el desarrollo efectivo de los SES e importante para la construcción más robusta y eficiente de los EPS en el futuro. Como decía Schweppe en 1979, “Es apropiado aplicar este concepto a un sistema de energía eléctrica en el que los sistemas de suministro y de demanda trabajan juntos para proporcionar un estado natural de equilibrio continuo en beneficio tanto de las empresas de servicios públicos como de sus clientes. Un conjunto de fuerzas físicas y económicas interrelacionadas mantiene el equilibrio entre el suministro eléctrico y la carga del cliente” [28].

La implementación de un sistema de eficiencia energética y la propensión al ahorro en un SES, son potenciados al ser combinados con una optimización basada en una lógica de control por homeostasis. Dentro de sus capacidades, la homeostasis puede ser estudiada y aplicada bajo un control reactivo y predictivo [27].

Homeostasis Reactiva (HR) en SES, como su nombre sugiere, es un mecanismo de retroalimentación impulsado por la generación y suministro de energía en comparación con el consumo o gasto de energía. Esto puede ser diseñado en SES mediante el empleo de sensores, actuadores de límite de control y algoritmos de Inteligencia Artificial (IA) que permiten que el sistema tome decisiones para responder a los cambios en un conjunto predeterminado de variables de control del sistema. Por lo tanto, SES toman medidas para contrarrestar o defenderse de las condiciones adversas que pueden afectar el funcionamiento normal del sistema.

Por otro lado, los mecanismos de Homeostasis Predictiva (HP) generan respuesta con suficiente antelación a los posibles o potenciales problemas, una vez que el sistema ha alcanzado un grado predeterminado de probabilidad de que ocurra un evento. Por lo tanto,

hay un conjunto de respuestas precisas que se producen en previsión de los problemas ambientales previsibles. Las respuestas HP permiten que el sistema de energía se prepare, tomando las precauciones y acciones necesarias para adaptarse e incluso reconfigurarse de forma anticipada, con el fin de responder al reto antes de tiempo. Tales acciones pueden venir en varias formas y dependen de los recursos y la inteligencia del sistema, pero están orientados a hacer los SES más seguros y capaces de soportar el próximo desafío mediante la activación de su mecanismo de control de preparación.

## Capítulo 3

# Metodología de Medición y Obtención de Datos

Este capítulo tiene por objetivo mostrar el protocolo de medición y obtención de datos que se usó para diseñar y validar el modelo electrotérmico de una nano red. Además, se establecen parámetros relevantes para medir la condición de confort térmico en una zona y se dan a conocer algunos de los requisitos de medición necesarios para la implementación de un EMS basado en el concepto de homeostasis.

### 3.1. Parámetros de interés

La optimización energética en una nano red, restringida a la obtención de confort térmico en una zona regularmente habitada, requiere la medición constante de variables fundamentales en su dinámica energética. Dentro del monitoreo se deben considerar todos los parámetros que repercuten en el confort térmico a corto y largo plazo, siendo el límite de evaluación la dinámica térmica diaria de la zona para que el control a implementar pueda programar de forma periódica la operación del sistema basándose en este límite temporal.

Los parámetros relevantes para esta investigación, se pueden dividir en dos conjuntos según impacto temporal que tengan estos en la dinámica electrotérmica de la zona. Esta división dependerá directamente de la función que cumplirán dentro del control homeostático, siendo fundamentales ya sea en la implementación del control reactivo o predictivo.

Para el estudio de control de la HR, los parámetros que afectarán al sistema son:

- *Temperatura interna del aire.*
- *Estado de red de distribución.*
- *Generación producida por el DER.*
- *Consumo eléctrico de la zona.*
- *Estado de carga del ESS.*

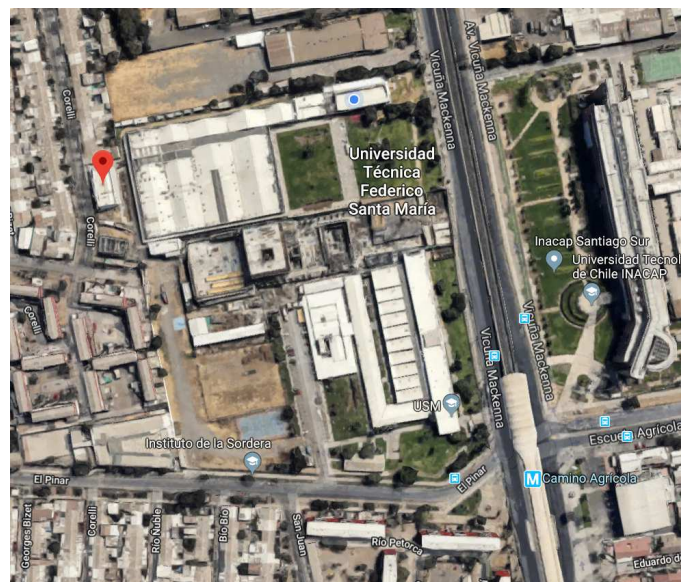
Por otra parte, para el estudio de control de la HP, es necesario tener conocimiento a futuro de:

- *Temperatura externa del aire.*
- *Humedad relativa.*
- *Radiación global horizontal.*
- *Velocidad del viento.*

De estas variables solo las tres primeras imparten un efecto sobre el confort térmico interno, mientras que la última permite proyectar la ganancia esperada por la generación eólica. Además, para el estudio de la HP debe tenerse completo conocimiento de la infraestructura de la zona, siendo esta determinante para poder crear un modelo térmico que simule su dinámica y confort.

### 3.2. Equipos de medición y registro de datos

La nano red de estudio en esta investigación, corresponde a un lugar físico situado en las coordenadas geográficas -33.490138, -70.620395, comuna de San Joaquín, Región Metropolitana, Santiago de Chile, según se muestra a continuación con imagen satelital.



**Figura 3.1:** Ubicación de la nano red por imagen satelital.

La infraestructura del edificio y la zona de estudio (correspondiente a una de las habitaciones del recinto) ya fueron simuladas en la investigación de Álvaro Valenzuela [16] con el software TRNSYS. En concreto, los diseños de infraestructura fueron diseñados en el programa SketchUp de diseño gráfico. A continuación, se presenta el diseño del edificio en estudio (Figura 4.1a) y se referencia la zona específica de análisis en la Figura 4.1b enmarcada con bordes azules.



**Figura 3.2:** Edificio de estudio (a) y zona específica (b). Modelo TRNSYS.

### 3.2.1. Medición de parámetros para HR

En el marco de los parámetros necesarios para desarrollar el control HR, si bien es necesario conocer las variables mencionadas en 3.1 al momento de implementar el sistema, algunos de los parámetros del punto de vista de la programación pueden ser simulados en base a las variables ambientales y por condiciones iniciales de operación de forma predictiva.

En particular, los parámetros:

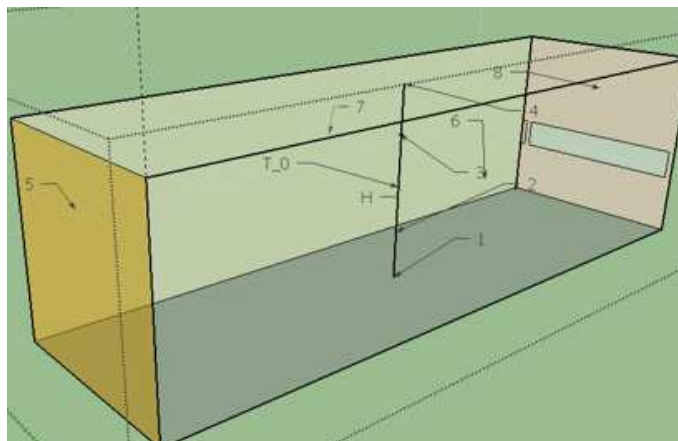
- *Estado de red de distribución.*
- *Generación producida por el DER.*
- *Estado de carga del ESS.*

Serán provistos para fines de esta investigación por modelos en software presentados en 4, usando los parámetros meteorológicos de la HP para obtener sus comportamientos. Sin embargo, queda expreso que al momento de implementar el sistema de control de estudio, con el objetivo de garantizar su operación efectiva, se deberá medir y monitorear constantemente estas variables.

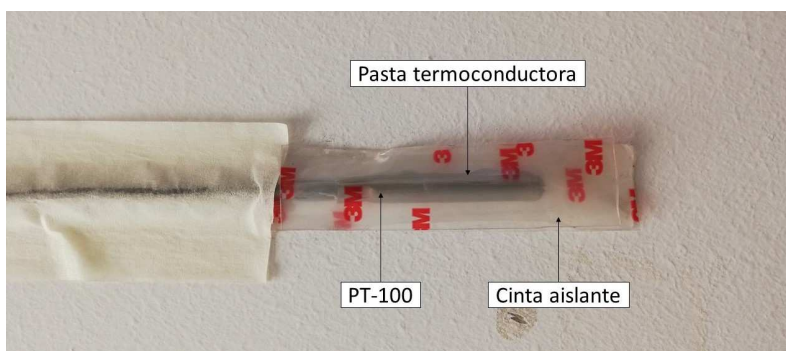
Los parámetros restantes para el estudio y control de la HR se medirán de la siguiente manera:

#### 3.2.1.a. Temperatura interna del aire y humedad relativa

En la zona de estudio se disponen diferentes puntos de medición para la temperatura interna, como se presentan en la Figura 4.2 simulada en TRNSYS. Los puntos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 son sensores PT-100 (datasheet en Apéndice 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 bajo el programa LabView. Los datos son registrados cada minuto.



**Figura 3.3:** Puntos de medición en zona de estudio. Modelo TRNSYS.



**Figura 3.4:** Punta de medición de temperatura de pared.

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. Además, para la medición de humedad relativa y la estratificación térmica se posicionó una barra de aluminio al centro de la habitación, y, a su vez, se ubicaron sensores de temperatura a lo largo de esta, de manera tal que se pudieran realizar mediciones a diferentes alturas dentro del cuarto, como se evidencia en Figura 3.5.

Para fines de esta investigación, todos los puntos de medición son utilizados para calibrar el modelo térmico desarrollado en TRNSYS, sin embargo, solo la medición central de temperatura obtenida por el montaje de medición para estratificación térmica, será el determinante para conocer la temperatura efectiva al interior de la habitación en todo momento.





*Figura 3.5: Montaje para medición de estratificación térmica en la habitación.*

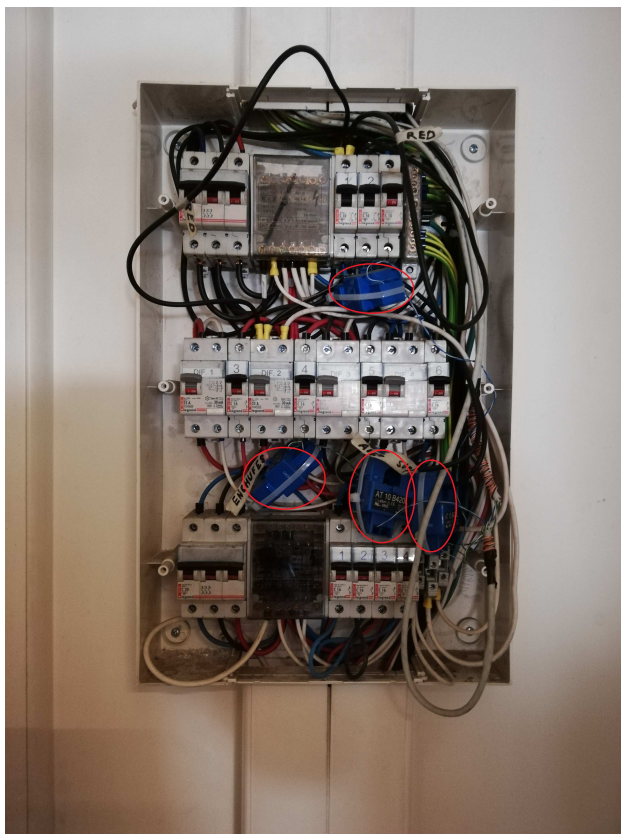
### 3.2.1.b. Consumo eléctrico de la zona

En cuanto al registro de consumo eléctrico de la zona de estudio, se realizaron mediciones con un analizador de redes, modelo FLUKE 1735 como el que se muestra en la Figura 3.6 (datasheet en Apéndice A.6). Las mediciones se realizaron directamente en la entrada de la habitación (zona de estudio), determinando el consumo eléctrico en  $[Wh]$  separados entre equipos HVAC y otros consumos (enchufes e iluminación).

El tablero de medición se ubica junto a la puerta de la habitación, tal como se muestra en la Figura 3.7. Debido a que en este punto se distribuyen consumos a distintas habitaciones del edificio, se midió solamente en los interruptores pertinentes a la zona de estudio.



*Figura 3.6: Analizador de redes FLUKE 1735.*



**Figura 3.7:** Tablero con medición en interruptores de la zona de estudio.

### 3.2.2. Medición de parámetros para HP

Para el estudio y análisis de la HP, su simulación e implementación es completamente diferente al de la HR. Para el desarrollo de este trabajo de investigación se realizaron mediciones de las distintas variables mencionadas en el apartado 3.1 en diferentes días y temporadas del año, esto con el fin de tener datos firmes del comportamiento meteorológico de la zona para poder definir eficientemente el esquema de control de la nano red. Sin embargo, del punto de vista de la implementación, solo algunas las variables que repercuten en el comportamiento térmico de la zona de estudio son relevantes, dejando fuera la *Velocidad del viento* y la *Humedad relativa* al momento de instalar equipos de medición.

La *Velocidad del viento* no es necesaria en la implementación ya que solo permite simular la ganancia producida por el aerogenerador, lo cual será monitoreado por la HR directamente. Por otra parte la *Humedad relativa* es descartada como requerimiento de implementación dado a que posee una baja influencia en la dinámica térmica al interior de la zona. La influencia de las variables sobre la dinámica térmica es presentada más adelante en el apartado 4.7, en donde se define el modelo térmico de la zona de estudio.

#### 3.2.2.a. Temperatura del aire y humedad relativa exterior

Las mediciones de temperatura y humedad externas a la zona de estudio, se realizan por medio de dos sensores de humedad relativa Tinytag RH Loggers (datasheet en Apéndice

A.3) y dos sensores de temperatura, de los cuales uno es un sensor de temperatura ambiente Tinytag Plus (datasheet en Apéndice A.4) y el otro es un PT-100. Los intervalos de medición son cada minuto.

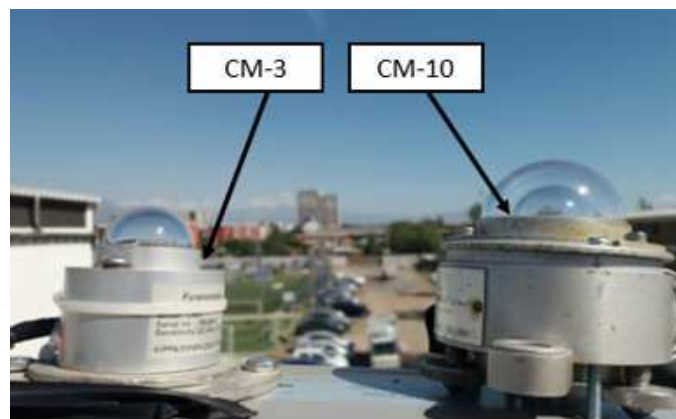
### 3.2.2.b. Radiación global horizontal

Los instrumentos que se utilizaron para medir radiación global horizontal fueron dos piranómetros (Kipp & Zonen) mostrados en la Figura 3.8 (datasheets en Apéndice A.5). Estos fueron instalados en el techo del edificio en donde se encuentra la zona de evaluación. 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 por Teiteman (2017) [30].

Estos instrumentos entregan una señal proporcional a una diferencia de voltaje, la cual se procesa con un factor de sensibilidad propio en cada instrumento para así obtener la radiación global horizontal. La sensibilidad de cada piranómetro es presentada en la Tabla 3.1.

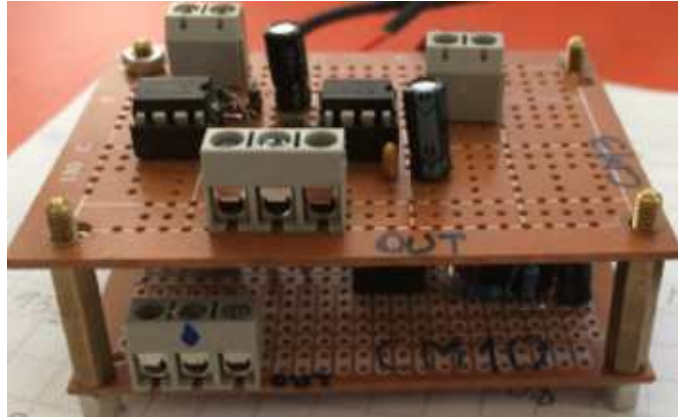
Parámetro	CM10	CM3
Sensibilidad [ $V/Wm^{-2}$ ]	$4,36 \cdot 10^{-6}$	$20,45 \cdot 10^{-6}$
Error [ $W/m^2$ ]	$\pm 10$	$\pm 25$

**Tabla 3.1:** Sensibilidad de los piranómetros.



**Figura 3.8:** Piranómetros instalados en el techo del edificio.

Debido a que estos instrumentos emiten una señal de voltaje entre los  $0 - 20 [mV]$  y  $0 - 30 [mV]$  (CMP-10 y CMP-3 respectivamente), con relación a los  $0 - 1500 [W/m^2]$ , la señal debe ser amplificada para alcanzar el rango permitido por el data logger, de rango  $0 - 200 [mV]$ . Para ello, se implementa un amplificador de señal (ver Figura 3.9) acorde con la relación de voltaje que debe tener cada uno.



*Figura 3.9: Amplificador de señal para voltaje.*

### 3.2.2.c. Velocidad del viento

Dado que la velocidad del viento no es una variable fundamental al momento de la implementación, pero sí es necesaria para considerar la generación eólica en el diseño del algoritmo de control, esta se obtiene desde una página web dedicada a la obtención de datos meteorológicos denominada Weather Spark [31]. El comportamiento de la variable en los días de interés son descargados directamente de su base de datos.

### 3.2.3. Errores Instrumentales

A continuación se resume en la Tabla 3.2 el error instrumental de los equipos de medición utilizados en el desarrollo de esta investigación.

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	$\pm 0,5 [C^\circ]$
PT 100	$\pm 0,5 [C^\circ]$
Datalogger temperatura	$\pm 0,03 [C^\circ]$
Datalogger humedad	$\pm 3 \%$
Analizador de redes	$\pm (1,5 \% \text{ of m.v.} + 20 \text{ digit})$

*Tabla 3.2: Resumen de errores instrumentales utilizados.*

## 3.3. Parámetros requeridos en implementación

A modo resumen de la información presentada en este apartado, se deja nota de los parámetros requeridos efectivamente por el algoritmo de control para poder operar al ser implementado de acuerdo al siguiente cuadro resumen (Tabla 3.3).

Implementación	HR	HP
<b>Requerido</b>	Temperatura interna del aire Estado de red de distribución Generación producida por el DER Consumo eléctrico de la zona Estado de carga del ESS	Temperatura externa del aire Radiación global horizontal
<b>No Requerido</b>	-	Humedad relativa Velocidad del viento

*Tabla 3.3: Resumen de errores instrumentales utilizados.*

### 3.4. Días de estudio y medición para simulación de nano red

Para poder diseñar y evaluar modelos de cada componente de la nano red y su desempeño general, se determina como método experimental la definición de días de operación para la adquisición de datos y obtención de resultados, que puedan representar el comportamiento típico en las dos épocas más extremas de irradiancia y temperatura del año (verano e invierno), que permitan la evaluación bajo distintos escenarios del sistema HVAC para control térmico.

Manteniendo la metodología de medición descrita en el capítulo, se definen periodos de seis días de medición:

- 10/02/2018 - 15/02/2018 (Verano)
- 07/07/2018 - 12/07/2018 (Invierno)

Para caracterizar el comportamiento meteorológico (irradiancia y temperatura externa) que afectará a la nano red y sus componentes, se realizaron las mediciones expuestas en las Tablas B.1 y B.2 (revisar Apéndice) según pasaba el tiempo allí expuesto, para los periodos de verano e invierno respectivamente.

Por otra parte, la velocidad del viento definida para el estudio de operación del equipo aerogenerador, fue extraída de la web dedicada a meteorología Weather Spark [31], como se mencionó anteriormente. El comportamiento de esta variable se encuentra definido en la Tabla B.3 adjunta en el Apéndice.

Adicionalmente, para caracterizar el consumo eléctrico de las cargas, tanto del equipo HVAC como el de los otros consumos de la zona de estudio, se mide el consumo y comportamiento de las cargas por un periodo de siete días, desde el 06/07/2018 hasta el 12/07/2018 medidos en forma horaria. También se volvieron a medir los consumos y comportamientos de las cargas en un periodo de tres días, desde el 19/12/2018 hasta el 21/12/2018 medidos por minuto. De los datos medidos se observa que el comportamiento de las cargas es similar cada día, haciendo la diferencia entre el consumo por HVAC y los demás consumos al interior de la zona.

Del consumo medido por el equipo HVAC se observa que hay una correlación con la diferencia entre las temperaturas interna y externa, lo que hace referencia al flujo de aire

que utiliza el HVAC para regular la temperatura. Por otra parte, no posee una válvula para el líquido refrigerante, lo que determina que la única forma que tiene para regular los cambios de temperatura son aumentando o disminuyendo el flujo de aire.

El equipo HVAC presenta consumos de entre los 1600,49 [W] y 2005,73 [W] en los instantes en que está actuando sobre la habitación, mientras que al estar en modo de espera (medición en rangos de confort internos de temperatura) mantiene un consumo promedio de 1,88 [W]. Al estar apagado simplemente el consumo es igual a 0 [W]. En modo de diseñar eficientemente el algoritmo de control, dado que al momento de implementarse estará midiendo el consumo real del equipo HVAC, para fines de simulación se establecerá un consumo promedio de **1800 [W]** al momento de trabajar.

Por otra parte el consumo de las demás cargas en la nano red poseen un comportamiento variable durante la noche y el día, adicional a la variación que se produce entre los días de semana y fin de semana. Para describir su comportamiento horario en términos de la simulación, se asume que el comportamiento de ellas se repite periódicamente semana tras semana, utilizándose los datos medidos directamente como input dentro de la simulación.

Los datos de consumo recién mencionados, son incluidos en la Tabla B.4 del Apéndice, en formato horario. En ellos se puede observar que el horario de ocupación de la zona de estudio es durante las 10:00:00 y las 20:00:00 hrs en días de semana.

# Capítulo 4

## Modelado del Sistema

En este capítulo se describe el diseño de los modelos eléctricos y térmicos participantes en el entorno de la nano red que se encuentra instalada en la zona de estudio. Además, se dan a conocer las características de la estrategia de control supervisor por homeostasis reactiva y predictiva, junto con su posterior modelo de simulación aplicado a la nano red.

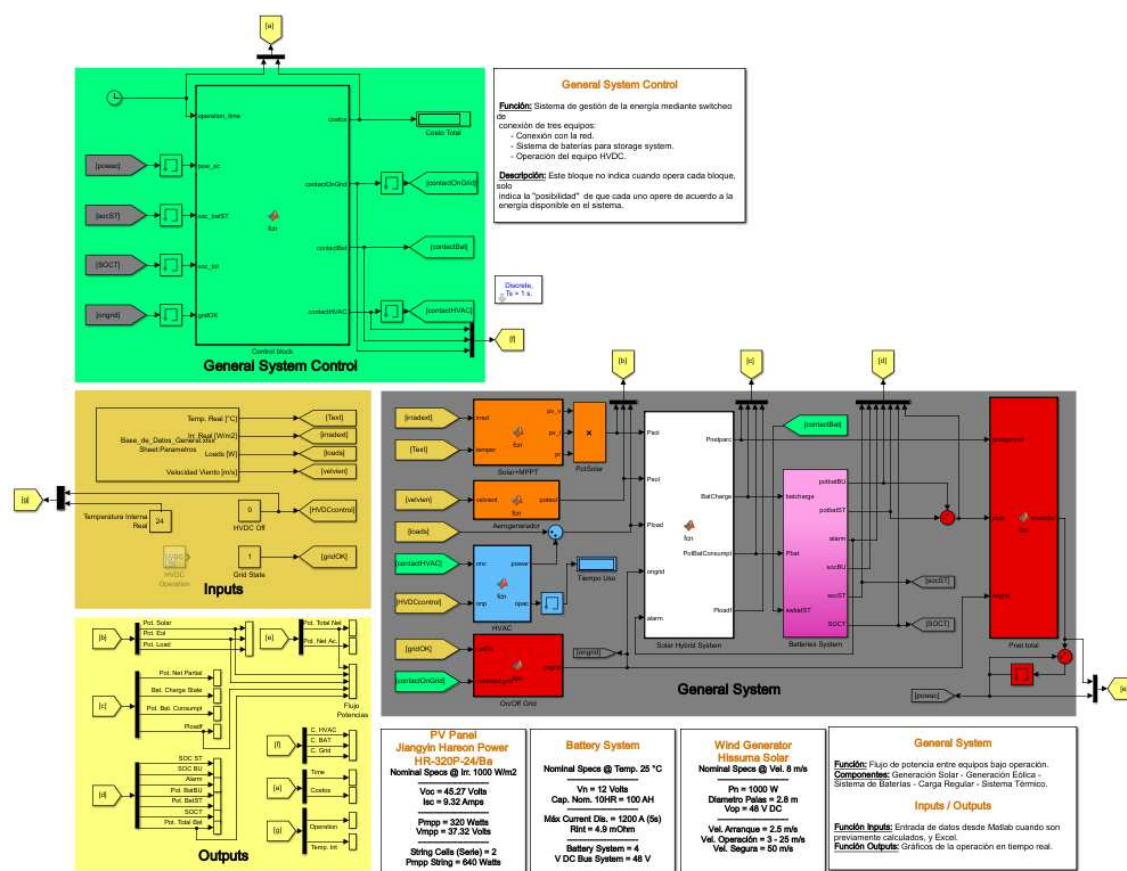
### 4.1. Entorno de simulación

Los sistemas eléctricos diseñados y presentados en este capítulo fueron elaborados por medio de la herramienta SIMULINK, mientras que los modelos térmicos fueron previamente diseñados y validados en el trabajo de tesis de Álvaro Valenzuela - alumno titulado de Ingeniería Civil Mecánica de esta casa de estudios - [16], utilizándose, para ello, el entorno TRNSYS. Ambas herramientas hallan su participación en el software matemático MATLAB, el cual se encarga de llamar cada modelo de acuerdo a la secuencia lógica de control diseñada de acuerdo a la estrategia a evaluar más adelante.

- **SIMULINK** es un entorno de programación de más alto nivel de abstracción que el lenguaje interpretado por MATLAB, que sirve para simular el comportamiento de los sistemas dinámicos. Puede simular sistemas lineales y no lineales, modelos en tiempo continuo y tiempo discreto y sistemas híbridos de todos los anteriores. Su entorno está constituido por bloques de control que provienen de diferentes librerías denominadas *blocksets* y que son presentados en un entorno gráfico [32].

Dentro de sus *blocksets*, existen algunos dedicados al diseño e implementación de sistemas eléctricos de potencia y sistemas DER o afines con las micro redes. A continuación, es posible ver de forma gráfica el entorno de trabajo en la Figura 4.1, donde se presenta el diseño completo de la nano red, la cual será descrita durante este capítulo.





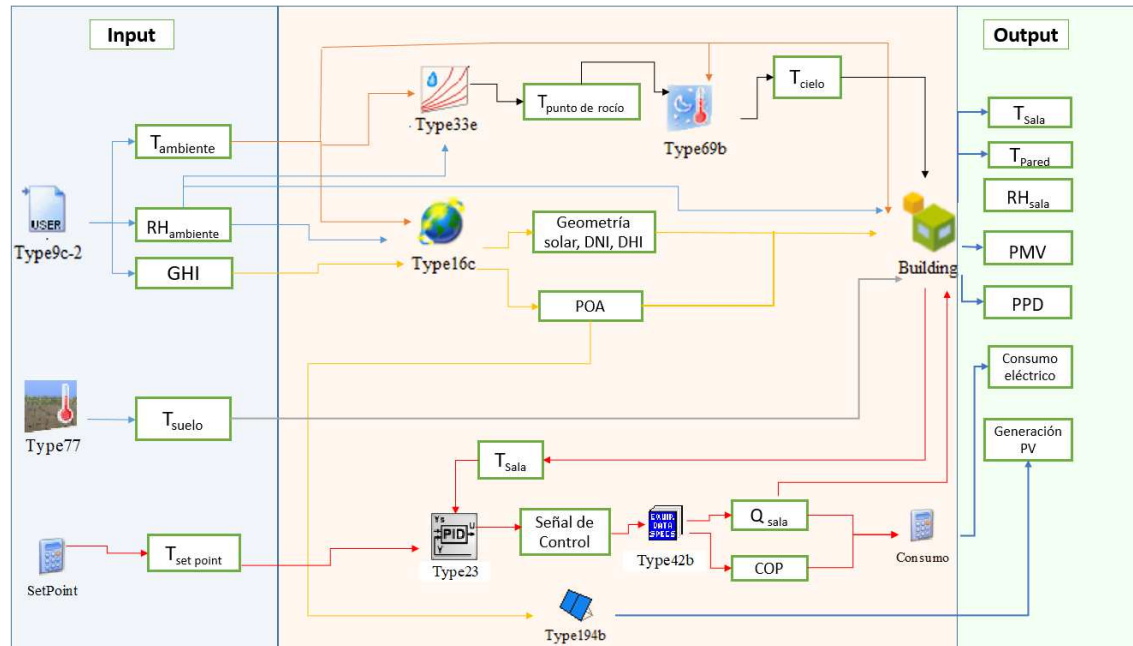
**Figura 4.1:** Diagrama de nano red en SIMULINK.

- **TRANSYS**

TRNSYS es un entorno de simulación flexible que permite la interacción de distintos componentes denominados *Types*. Estos simulan diferentes aspectos del comportamiento de equipos térmicos, eléctricos, estructurales, fenómenos físicos, entre otros, con la finalidad de conseguir una respuesta transitoria de los mismos con respecto a las variables de estudio. Las descripciones completas de cada componente están disponibles en el manual del programa TRNSYS [25].

TRANSYS Simulation Studio funciona como un ambiente interactivo del tipo caja negra, donde existe una serie de inputs que se relacionan entre sí en base a ecuaciones que generan outputs al tiempo que describen cada *Type*. En particular, el diseño térmico de una habitación específica, incluye el flujo de calor procedente de diferentes variables como las habitaciones adyacentes, posibles aberturas hacia el exterior, variables estructurales del edificio, entre otras. En la Figura 4.2 se ilustra el modelo generado para el sistema HVAC de estudio, el cual será descrito posteriormente.





**Figura 4.2:** Diagrama de modelo térmico de la zona de estudio. [16]

#### ■ MATLAB

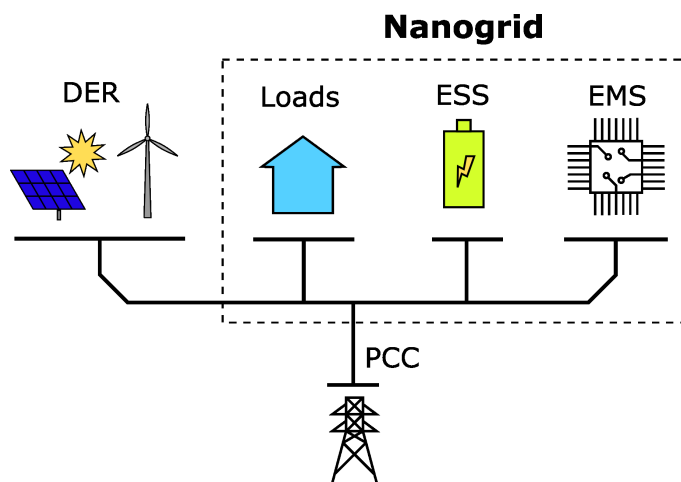
El entorno MATLAB es un conjunto de herramientas que permiten trabajar como usuario o como programador. Permiten importar, procesar y exportar datos; crear y modificar ficheros; generar gráficos y animaciones; y desarrollar aplicaciones de usuario. Muchas de las funciones matemáticas y de aplicación (análisis estadístico, optimización, diseño en ingeniería) están predefinidas y agrupadas en librerías comerciales, llamadas *toolboxes*. El usuario puede acceder a la mayor parte de estas funciones para modificarlas y/o crear las suyas propias [32].

Una de las particularidades MATLAB es que puede intercambiar datos con otros lenguajes y entornos. Puede acceder a distintos dispositivos de hardware tales como tarjetas de sonido, tarjetas de adquisición de datos y DSPs (Digital Signal Processors). Es gracias a esta flexibilidad que MATLAB es un entorno capaz de operar las herramientas de TRNSYS y SIMULINK en un mismo código de trabajo, permitiendo el desarrollo de algoritmos de control innovadores, desarrollados para aprovechar el potencial de cada una de las herramientas mencionadas.

## 4.2. Esquema general nano red

Para poder explicar cómo se desarrolla el modelo general de la nano red, es necesario conocer primero su esquema, para luego ir definiendo parte por parte cada uno de sus componentes y comprender cómo estos deberán comunicarse entre sí a través del EMS de la nano red para llevar a cabo la gestión de energía.

En general, la nano red de estudio es descrita por cinco componentes, tal y como se puede observar en la Figura 4.3 que se disponen de la siguiente manera:



**Figura 4.3:** Esquema general de la nano red de estudio. Elaboración propia.

- **DER:** El sistema DER, es el conjunto de sistemas de generación distribuida ERNC que participan en la nano red. En su conjunto, se puede encontrar la participación de paneles fotovoltaicos y un equipo aerogenerador.
- **Loads:** Las cargas (Loads) del sistema comprenden únicamente las cargas producidas al interior de la habitación, estas vienen siendo un sistema HVAC que regula la temperatura y un conjunto de cargas compuesto por enchufes, luminaria y equipos en general que estén conectados a la red eléctrica.
- **ESS:** El ESS se compone de cuatro baterías cuya función recae en el almacenamiento de la energía recibida por la nano red
- **EMS:** El EMS corresponde al procesador del control por homeostasis diseñado para gestionar la energía de la red.
- **PCC:** El PCC es el punto de conexión con el sistema de distribución local, que se encuentra definido físicamente por un medidor bidireccional que permite obtener las horas de consumo y generación de la nano red, junto a un interruptor general conectado en serie al medidor.

Recordando la definición descrita inicialmente sobre el funcionamiento de una nano red en el capítulo introductorio 1, según lo que se presenta en la Figura 1.1, el sistema DER y el sistema de distribución que conecta el PCC no son sistemas gestionables por la nano red misma, quedando como circuitos que únicamente se pueden conectar y desconectar de la nano red independientemente del estado de operación propio que tengan en cada momento.

### 4.3. Modelo sistema DER

El sistema DER en su conjunto, posee un sistema de generación solar fotovoltaica y otro sistema con generación eólica, ambos sistemas poseen equipos de control que se encargan de obtener la máxima potencia posible dado el estado de operación en que se encuentran, según las variables que afectan el sistema como la radiación solar, temperatura o velocidad

del viento. Este sistema común es llamado MPPT (Maximum Power Point Tracking) y es común verlo implementado en turbinas eólicas y paneles fotovoltaicos.

Sus componentes e información nominal son presentadas a continuación:

- **Generación solar:** Está compuesta por dos paneles fotovoltaicos conectados en serie en forma de string <sup>1</sup>, marca y modelo Jiangyin Hareon Power HR-320P-24/Ba (datasheet en Apéndice A.7). En la Figura 4.4 es posible ver el estado actual de ambos paneles.
- **Generación eólica:** Está compuesta por un equipo aerogenerador. Su modelo no está correctamente definido dado a que es un equipo especialmente diseñado del que sólo se conocen las características principales. En vista de lo anterior, para no dificultar la simulación de su comportamiento, se considera un equipo de similares características marca Hissuma Solar (datasheet en Apéndice A.8). En la Figura 4.4 se puede ver el equipo aerogenerador instalado detrás de los paneles fotovoltaicos.



*Figura 4.4: Placas y aerogenerador instalados en la nano red.*

El resumen de la ganancia y comportamiento eléctrico de ambos sistemas de generación se puede observar en los recuadros de la Figura 4.5 expuesta a continuación.

<sup>1</sup>Un string es una cadena de paneles conectados en serie que luego son conectados a la entrada del inversor

<p><b>PV Panel</b> Jiangyin Hareon Power HR-320P-24/Ba</p> <p>Nominal Specs @ Irr. 1000 W/m<sup>2</sup></p> <hr/> <p>Voc = 45.27 V Isc = 9.32 A</p> <hr/> <p>Pmpp = 320 W Vmpp = 37.32 V</p> <hr/> <p>String Cells (Serie) = 2 Pn String = 640 W</p>	<p><b>Wind Generator</b> Hissuma Solar</p> <p>Nominal Specs @ Vel. 8 m/s</p> <hr/> <p>Pn = 1500 W Diametro Palas = 3 m Vop = 48 V DC</p> <hr/> <p>Vel. Arranque = 2.5 m/s Vel. Operación = 3 - 25 m/s Vel. Segura = 50 m/s</p>
--	--

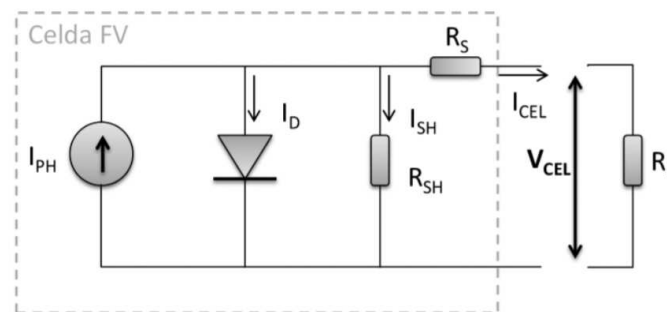
**Figura 4.5:** Resumen de ganancia DER.

A continuación, se presenta la metodología de simulación y validación de los ERNC que componen el DER.

### 4.3.1. Generación solar

Para la simulación de la generación solar fotovoltaica, se utiliza el modelo pre existente en los *blocksets* del SIMULINK para este tipo de tecnología, denominado *PV Array*. El modelo *PV Array* calcula la ganancia en tensión y corriente del sistema fotovoltaico introduciendo el modelo de paneles y el arreglo por string que se tenga. Para especificar y validar su uso, primero se debe conocer las ecuaciones y características referentes al modelo *PV Array*.

El circuito equivalente de un panel solar consta del modelo matemático ideal de un diodo clásico de unión p-n (estructura fundamental de los semiconductores) que, por medio del efecto fotoeléctrico, convierte la radiación solar en energía eléctrica, junto con componentes electrónicos como fuentes y elementos resistivos que emulan las pérdidas que se presentan en un entorno real [33]. La fuente  $I_{ph}$  es la corriente fotogenerada a un valor fijo de radiación solar, la resistencia Shunt ( $R_{sh}$ ) representa la pérdida por corriente de fuga, la resistencia serie ( $R_s$ ) se utiliza para representar la caída de voltaje a la salida y la resistencia de carga ( $R_L$ ) representa la carga usada para la medición. La resistencia  $R_L$  es una resistencia variable que debe ser definida según el caso de estudio, donde la corriente y el voltaje del panel fotovoltaico dependerán de su valor y presentarán características no lineales y limitadas de potencia.



**Figura 4.6:** Circuito equivalente de un panel solar.

Aplicando la ley de voltaje y corriente de Kirchhoff al circuito de la Figura 4.6, se puede deducir la corriente generada ( $I_{cel}$ ) por el panel solar, como se muestra en las ecuaciones 4.1 y 4.2:

$$I_{cel} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (4.1)$$

$$I_{cel} = I_{ph} - I_0 \left[ e^{\frac{q(V + I_{cel}R_s)}{KT_cA}} - 1 \right] - \frac{V + I_{cel}R_s}{R_{sh}} \quad (4.2)$$

Donde  $I_{ph}$  es la corriente fotogenerada,  $I_0$  es la corriente de saturación inversa del diodo,  $q$  es la carga del electrón ( $1,6 \cdot 10^{-19} C$ ),  $V$  voltaje de la celda solar,  $K$  es la constante de Boltzmann ( $1,38 \cdot 10^{-23} J/K$ ),  $T_c$  temperatura de operación de la celda y  $A$  factor de idealidad.

La corriente fotogenerada varía en función de la radiación solar y la temperatura de la celda presentes en la medición, como se describe en la ecuación 4.3.

$$I_{ph} = \frac{R}{R_{ref}} [I_{l_{ref}} + U_{I_{sc}} (T_C - T_{C_{ref}})] \quad (4.3)$$

Siendo  $R$  la radiación solar medida en el instante,  $R_{ref}$  la radiación solar en condiciones estándar  $1000 W/m^2$ ,  $I_{l_{ref}}$  es la corriente fotogenerada en condiciones de referencia tomada como la corriente de cortocircuito ( $I_{sc} = I_{l_{ref}}$ ),  $U_{I_{sc}}$  coeficiente de temperatura de corriente de corto circuito  $U_{I_{sc}} = 0,055 \text{ } \%/^{\circ}C$  (de la Figura A.7 en Apéndice) y  $T_{C_{ref}}$  temperatura de trabajo de la celda en condiciones estándar ( $298^{\circ}K$ ). La corriente de saturación inversa del diodo depende también de la temperatura, que se describe en la ecuación 4.4:

$$I_0 = I_{0_{ref}} \left( \frac{T_C}{T_{C_{ref}}} \right)^3 e^{\left[ \frac{qE_g \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_C} \right)}{KA} \right]} \quad (4.4)$$

Donde  $I_{0_{ref}}$  es la corriente de saturación inversa en condiciones de referencia y  $E_g$  energía del semiconductor en su banda prohibida o Bandgap. La corriente  $I_{0_{ref}}$  se define según la ecuación 4.5.

$$I_{0_{ref}} = \frac{I_{SC}}{e^{\left( \frac{V_{OC}}{N_s K T_{C_{ref}} A} \right)} - 1} \quad (4.5)$$

Normalmente las celdas solares producen  $2 W$  a  $5 V$  [34]. Dado lo anterior, para lograr la potencia deseada es necesario agruparlas en serie o paralelo. Entonces, a la ecuación de una celda fotovoltaica descrita en 4.2 se le agregan los coeficientes  $N_p$ , que es número de módulos en paralelo, y  $N_s$  número de celdas en serie, de manera que la ecuación característica corriente-voltaje de un panel solar se denota en la ecuación 4.6.

$$I_{panel} = N_p \cdot I_{ph} - N_p \cdot I_0 \left[ e^{\frac{q \left( \frac{V}{N_s} + \frac{I_{cel}R_s}{N_p} \right)}{KT_cA}} - 1 \right] - \frac{V \left( \frac{N_p}{N_s} \right) + I_{cel}R_s}{R_{sh}} \quad (4.6)$$

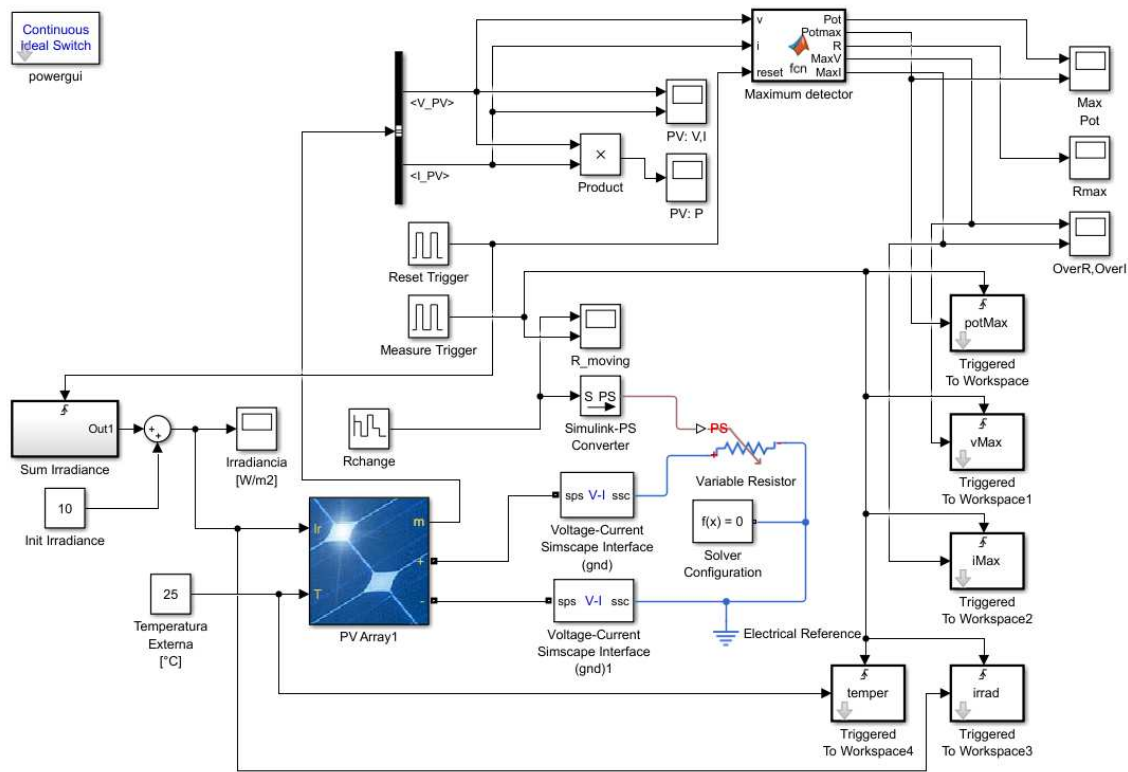
La ecuación 4.6 generalmente se reduce a la 4.7, ya que varios autores simplifican la ecuación pues la resistencia Shunt no afecta en la eficiencia de una celda solar, porque

la resistencia tiende a ser muy grande o infinita, así que se puede asumir  $R_{sh} = \infty$ . No obstante, la resistencia serie sí tiene un efecto significativo en el comportamiento de la celda, por lo tanto:

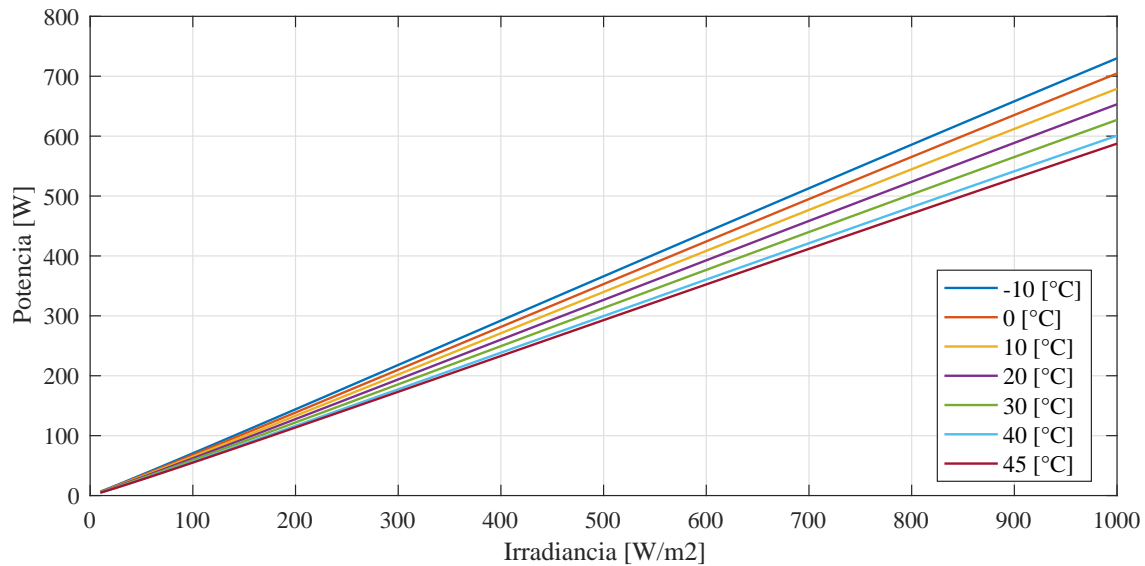
$$I_{panel} = N_p \cdot I_{ph} - N_p \cdot I_0 \left[ e^{\frac{q(\frac{V}{N_s} + \frac{I_{cel} R_s}{N_p})}{K T_c A}} - 1 \right] \quad (4.7)$$

Una vez comprendido el modelo del *blockset PV Array*, se implementó el *blockset* conectado a una resistencia variable entre los 0 y 1000  $\Omega$ , junto con una entrada de irradiancia variable entre 0 y 1000  $W/m^2$ , y con temperatura fija. Esto con el fin de obtener el MPP (Maximum Power Point) de la generación fotovoltaica para distintos niveles de temperatura en todo el espectro observado por mediciones en el lugar de la radiación horizontal. La simulación descrita se puede observar en la Figura 4.7 a continuación.

A partir de los gráficos obtenidos por esta simulación, es posible determinar el MPP para temperaturas que varíen entre los  $-10^\circ C$  y  $45^\circ C$ , aproximando el valor a la curva conocida más cercana según el gráfico de la Figura 4.8.

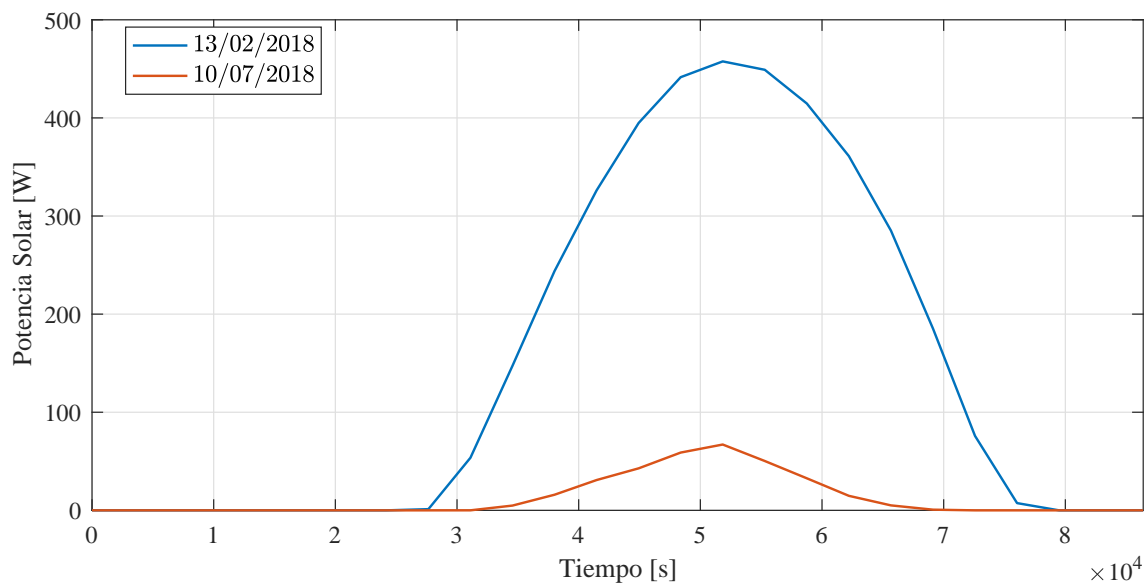


**Figura 4.7:** Esquema del arreglo fotovoltaico para la obtención del MPP. Elaboración propia.



**Figura 4.8:** Gráfico de potencia vs radiación para distintos valores de temperatura.

Una vez determinado el comportamiento de la generación solar en el DER de la nano red, se procedió a simular la generación producida de acuerdo a las mediciones de radiación y temperatura al exterior de la habitación en ambas épocas de estudio, verano e invierno, según las mediciones presentadas en la Tabla B.1 del Apéndice. La generación producida según simulación para un día de invierno (en rojo) y uno de verano (en azul) son presentadas en la Figura 4.9 a continuación.



**Figura 4.9:** Gráfico de potencia vs tiempo del día en segundos de la generación solar.

#### 4.3.2. Generación eólica

Para la generación eólica, por su parte, dado a que no se tiene un *blockset* prediseñado para la evaluación y generación de sistemas eólicos con aerogeneradores de baja potencia,

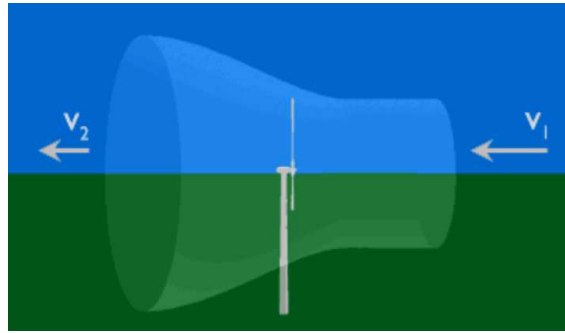
se decide atenerse directamente al comportamiento descrito por el datasheet del modelo aerogenerador presentado previamente (Anexo A.8). Pero primero, se definirá en términos generales cómo se comporta la potencia eléctrica producida por un equipo aerogenerador.

En general, la potencia de una masa de aire puede ser descrita como [38]:

$$P_v = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (4.8)$$

En donde  $A$  es la superficie del volumen de aire que impacta con el molino,  $\rho$  es la densidad del aire la cual varía según la temperatura, la altura (presión) y la humedad en el ambiente, y por último  $v$  es la velocidad del viento. De aquí se desprende que la potencia depende principalmente de la velocidad del viento y que también posee una característica cuadrática al diámetro del aerogenerador por su relación con la superficie.

La Ley de Betz define la potencia captada por un obstáculo que frena el libre movimiento del viento. La potencia captada por el aerogenerador se define como la diferencia instantánea de la energía cinética del viento antes y después de pasar por el obstáculo en un tiempo  $\Delta t$  (ver Figura 4.10).



**Figura 4.10:** Comportamiento del viento frente a un aerogenerador.

$$P_{captado} = \frac{E_{cinetica1} - E_{cinetica2}}{\Delta t} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta m_{aire}}{\Delta t} \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (4.9)$$

La masa de aire que pasa por el aerogenerador también se puede definir como:

$$\frac{\Delta m_{aire}}{\Delta t} = \rho A \frac{(V_1 + V_2)}{2} \quad (4.10)$$

Así sustituyendo en 4.9:

$$P_{captado} = \frac{1}{4} \rho A (V_1^2 - V_2^2) \cdot (V_1 + V_2) \quad (4.11)$$

Luego de esto, se puede definir entonces: la razón entre la potencia captada sobre la potencia del viento incidente definida por la ecuación 4.8 (donde  $v = V_1$ ) como:

$$\frac{P_{captado}}{P_{viento}} = \frac{1}{2} \cdot [1 - (V_2/V_1)^2] \cdot [1 + (V_2/V_1)] \quad (4.12)$$

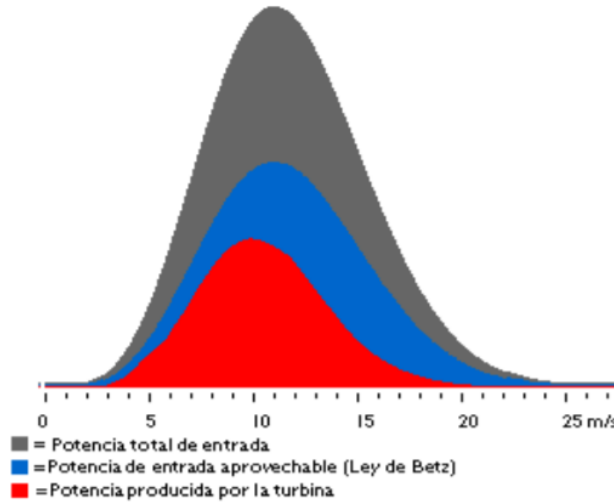


Lo anterior permite definir una función  $P_{captado}/P_{viento}$  v/s una variable  $V2/V1$ . La curva obtenida en la figura 4.11, define un máximo en  $V2/V1 = 1/3$  con una potencia máxima captada de  $P_{captada} = (16/27) \cdot P_{viento}$ . Como resumen se define entonces la ecuación 4.13 expuesta a continuación, que indica la máxima cantidad de energía cinética del viento que es posible transformar en energía mecánica rotacional según la Ley de Betz.

$$P_{captada} = 0,59 \cdot P_{viento} \quad (4.13)$$

En cuanto al comportamiento típico del viento en un emplazamiento aleatorio, suele describirse utilizando la llamada Distribución de Weibul, la cual permite obtener la velocidad del viento media en un lugar tras haber realizado mediciones de su comportamiento, permitiendo dimensionar de forma correcta el tamaño del equipo aerogenerador.

En general, al aplicar la Ley de Betz a una Distribución de Weibull, es posible obtener la curva azul presentada en la Figura 4.11 a continuación:



**Figura 4.11:** Potencia del viento.

Teniendo en cuenta la ley de Betz, se sabe que no es posible convertir toda la energía del viento en energía mecánica rotacional. El límite de Betz se ve disminuido por varios elementos que conllevan distintas pérdidas en el proceso de conversión de energía. Lo anterior se puede expresar de la siguiente forma:

$$P_{mec} = C_p \cdot P_{viento} = C_p \cdot \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (4.14)$$

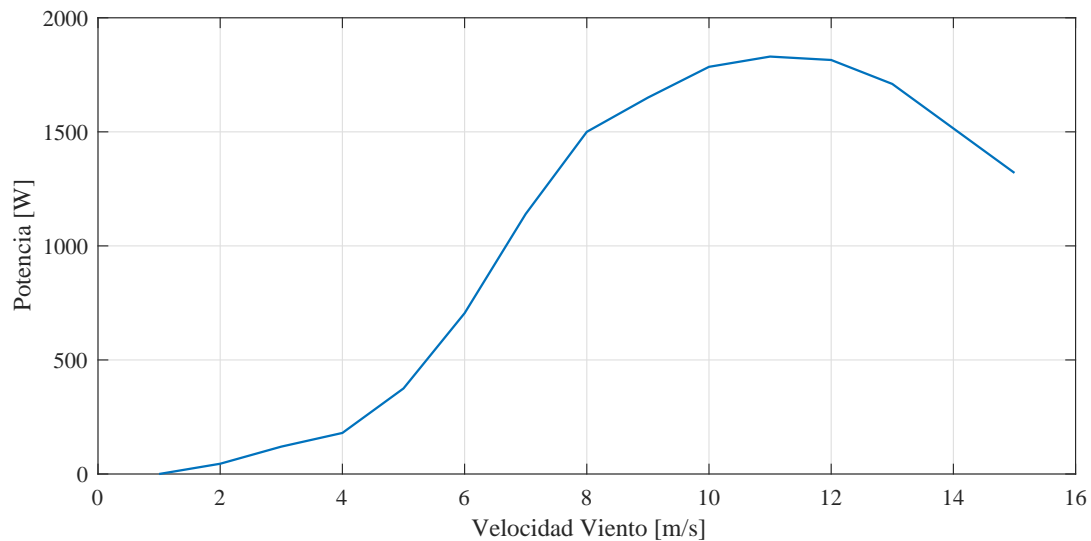
En donde  $C_p$  no puede superar el límite de Betz. Y adicionalmente:

$$P_{electrica} = C_e \cdot P_{mec} = C_e \cdot C_p \cdot P_{viento} = C_e \cdot C_p \cdot \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (4.15)$$

Donde  $C_e$  es la eficiencia (aproximadamente un 90 %) de la máquina eléctrica y  $C_p$  no es constante y varía principalmente con la velocidad del viento.

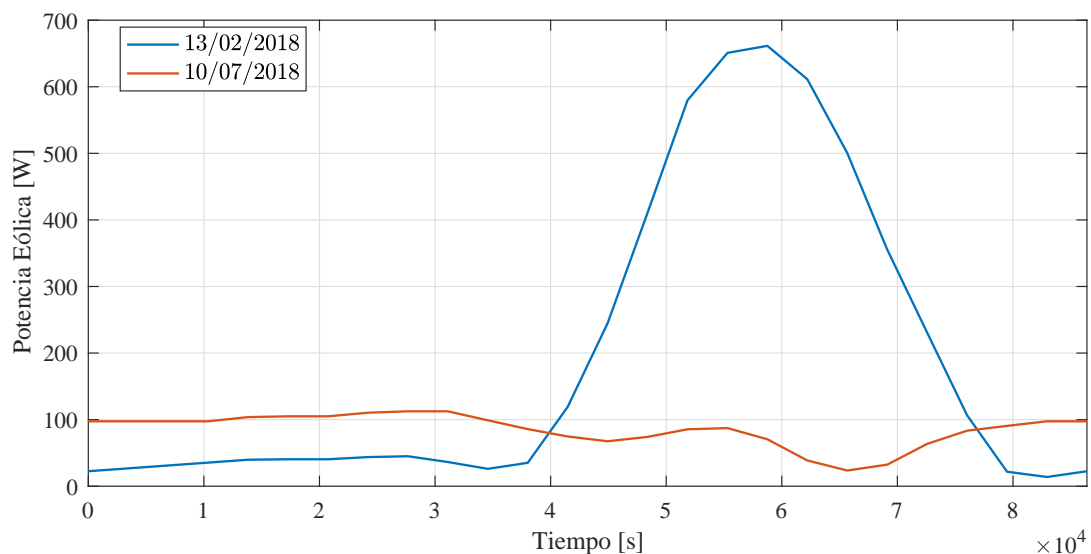
La ecuación 4.15 es la que da lugar al comportamiento de la curva de color rojo presentada en la Figura 4.11 anteriormente. Por último, para evitar posibles daños en la turbina o en sus alrededores, se insta una velocidad de corte que generalmente se encuentra en los 25  $[m/s]$ .

Teniendo en cuenta estos conceptos, se evalúa el desempeño del aerogenerador de acuerdo con la información descrita por el datasheet, de esta manera se evalúa directamente la curva de generación eléctrica en función a la velocidad del viento como se observa en el gráfico de la Figura 4.12.



**Figura 4.12:** Gráfico de potencia vs velocidad del viento para el aerogenerador.

Una vez conocido el comportamiento del equipo aerogenerador, utilizando las mediciones realizadas en el apartado Metodología de Medición y Obtención de Data, se determina la generación esperada por el equipo aerogenerador en ambas épocas de estudio según gráfico de la Figura 4.13.



**Figura 4.13:** Gráfico de potencia vs tiempo del día en segundos de la generación eólica.

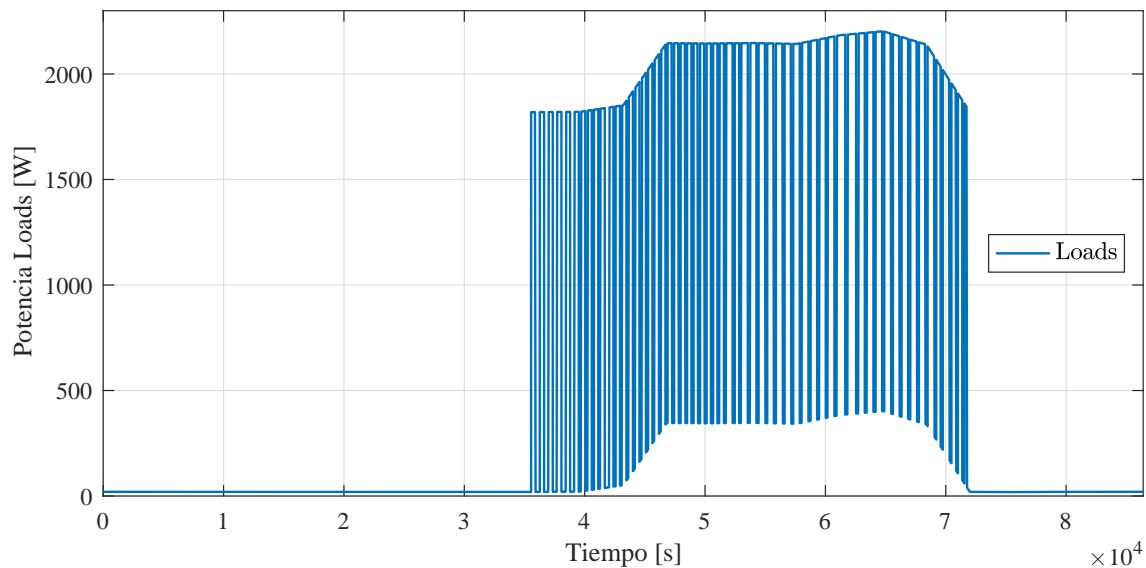
#### 4.4. Modelo de las cargas eléctricas (Loads)

Las cargas que interactúan al interior de la nano red son divididas en dos conjuntos como se explicó previamente en el apartado 3.4. Uno de los conjunto corresponde a un grupo de cargas al interior de la habitación, compuestas por luminaria y equipos conectados a la red a través de enchufes como computadores u otros. Este primer conjunto posee un comportamiento definido de consumo eléctrico como el que se señala en la Tabla B.4.

Por otra parte, se tiene el conjunto conformado por el sistema HVAC. Este sistema se caracterizó por tener un consumo con un rango definido de potencia entre los 1600, 49 [W] y 2005, 73 [W] durante su operación. También posee un valor de potencia relativamente constante en su tiempo de espera de 1, 88 [W], mientras verifica que la temperatura esté dentro del rango de confort internamente establecido en el equipo y también se observó una potencia de 0 [W] cuando se encuentra apagado el sistema HVAC.

De acuerdo con lo previamente enunciado en el apartado 3.4, en modo de diseñar eficientemente el algoritmo de control, dado que al momento de implementarse estará midiendo el consumo real del equipo HVAC, para fines de simulación se establecerá un consumo promedio de **1800 [W]** al momento de estar efectuando un intercambio de calor, mientras que el estado de espera se considerará simplemente como un estado apagado, ya que será el EMS quien llamará a operar al sistema HVAC.

Al tener parámetros conocidos la simulación de ambos conjuntos es fácil de entender y aplicar del punto de vista eléctrico. En un día laboral, en horario de oficina, es decir, entre las 10:00 hrs de la mañana y las 20:00 hrs de la noche (definido en el apartado 3.4), se observa que el sistema HVAC tienda a estar encendido en forma continua a lo largo de todo el tiempo, ya sea en espera o intercambiando calor. Debido a esto se puede observar el consumo eléctrico de las cargas en un día hábil como se indica en el gráfico de la Figura 4.14 considerando tanto el sistema HVAC como las demás cargas.



*Figura 4.14: Consumo de las cargas en un día hábil de operación.*

## 4.5. Modelo ESS

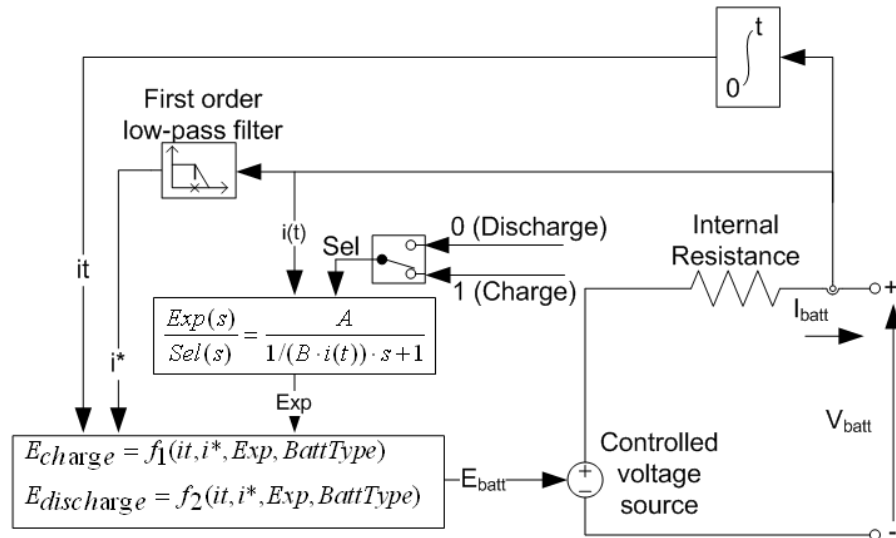
El sistema de almacenamiento de energía en la nano red de estudio consiste en un conjunto de cuatro baterías conectadas en serie, cada una de un voltaje nominal de 12 [V] que al ser conectadas en serie alcanzan un valor de tensión en conjunto de 48 [V], correspondiente al voltaje del bus <sup>2</sup> DC de la nano red. La marca y el modelo de las baterías instaladas en el lugar es Curtiss Technologies CT 12 1000 (datasheet en Apéndice A.9). En la Figura 4.15 a continuación es posible ver un ejemplar de batería instalada en la nano red.



**Figura 4.15:** Baterías instaladas en la nano red.

Para la simulación de baterías se utiliza un modelo pre existente en los *blocksets* de SIMULINK llamado *Battery*. El modelo obtiene el SOC de la batería, dependiendo del nivel de tensión y corriente que ingresan por sus terminales, siendo determinante definir una metodología correcta para la carga de las baterías.

El circuito equivalente de la batería que utiliza el modelo *Battery* es un modelo dinámico genérico parametrizado, como el que presenta la Figura 4.16. Para el caso de una batería ácida de plomo, este considera las siguientes ecuaciones:



**Figura 4.16:** Circuito equivalente de la batería según modelo en SIMULINK. [35]

<sup>2</sup>El bus corresponde a un punto de conexión común para equipos (voltaje fijo).

**Descarga de batería** ( $i^* > 0$ )

$$f_1 (met, me^*, me, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q - met} \cdot me^* - K \cdot \frac{Q}{Q - met} \cdot met + Laplace^{-1} \left( \frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot 0 \right) \quad (4.16)$$

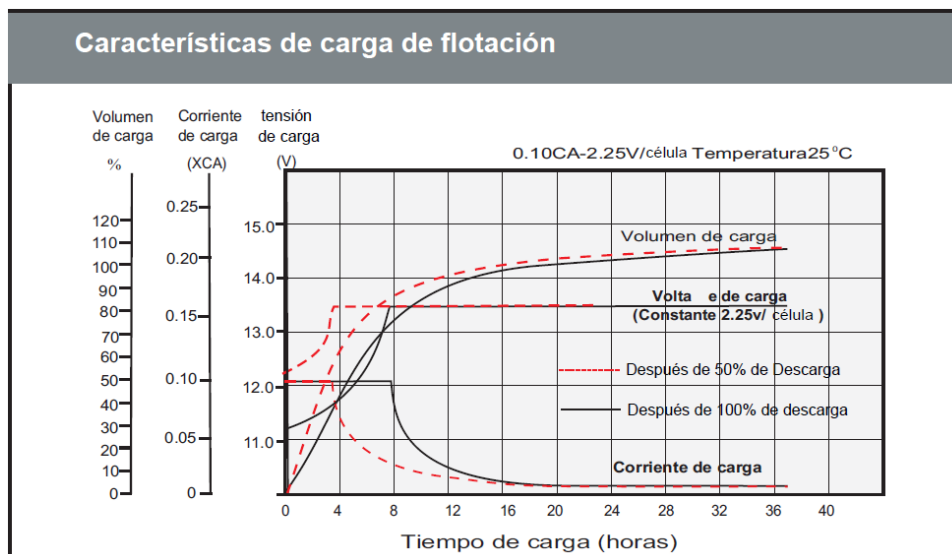
**Carga de batería** ( $i^* < 0$ )

$$f_2 (met, me^*, me, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{met - 0,1 \cdot Q} \cdot me^* - K \cdot \frac{Q}{Q - met} \cdot met + Laplace^{-1} \left( \frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot \frac{1}{s} \right) \quad (4.17)$$

En donde  $E_{Batt}$  es voltaje no lineal,  $E_0$  es un voltaje constante,  $Exp(s)$  es la dinámica de zona exponencial del voltaje,  $Sel(s)$  representa el modo de la batería (0 para descarga y 1 para carga),  $K$  es la constante de polarización,  $i^*$  es dinámica de corriente de baja frecuencia,  $i$  es la corriente de la batería,  $it$  es capacidad extraída,  $Q$  es la capacidad máxima de la batería,  $A$  es voltaje exponencial y  $B$  es capacidad exponencial.

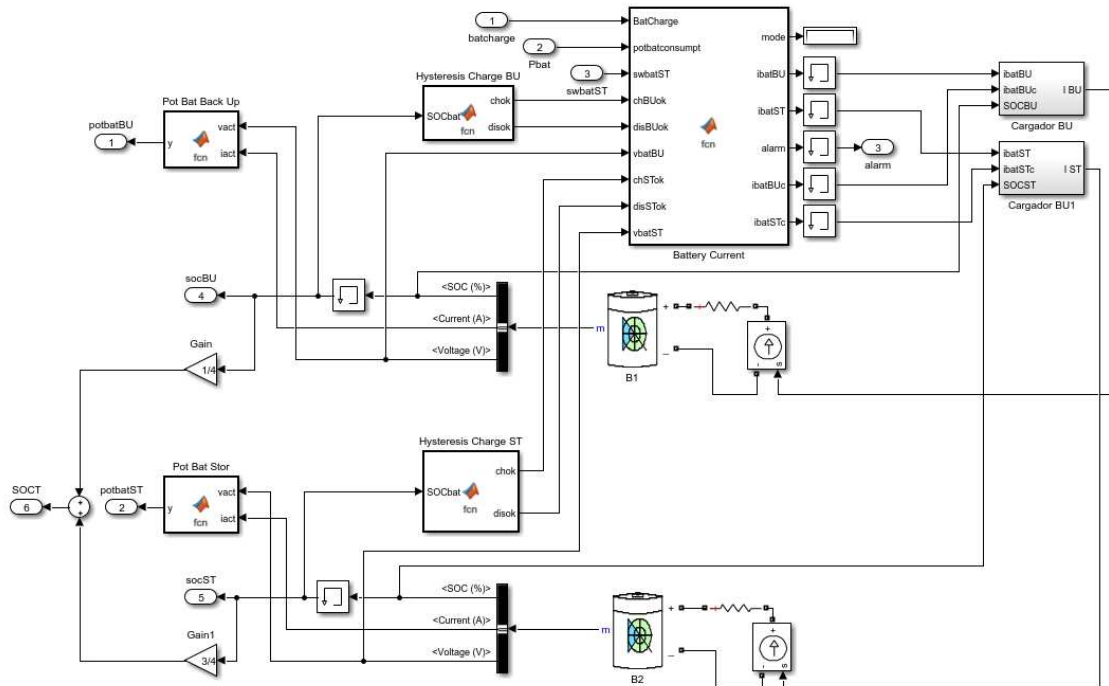
El proceso de carga simulado en la nano red se adhiere directamente al comportamiento de carga del datasheet del producto, dejando la descarga como un proceso por determinar de acuerdo a la necesidad de consumo que tenga el sistema en todo momento (según lógica de control a definir más adelante. La curva de carga del producto es como se describe en la Figura 4.17, denotando tres procesos de carga [36] a conocer e implementar por la simulación del ESS y la nano red. A saber:

- **Fase Bulk:** Se trata de inyectarle a la batería una corriente constante, tan alta como lo permita el cargador (entendiendo que el cargador ha sido correctamente dimensionado) durante un periodo de tiempo. Dentro de la simulación se modelará como una fuente de corriente de 10,41667 [A], de acuerdo al inicio de carga de la Figura 4.17.
- **Fase Absorción:** Cuando se alcanza el valor preseleccionado de voltaje de absorción, la carga de la batería se limita a la cantidad de corriente que la misma es capaz de absorber a un voltaje determinado. Esto implica que es muy importante que se puedan definir los voltajes de carga con exactitud y de acuerdo a lo que el fabricante de la batería indica. Esta fase se caracteriza por mantener un voltaje constante mientras la corriente decrece exponencialmente. En la simulación esta fase se modelará como una fuente de corriente con decrecimiento exponencial, considerando un valor inicial de 10,41667 [A] y un  $\tau = -\frac{1}{9000}$  [s] (determinar por imagen de la Figura 4.16).
- **Fase Flotación:** Una vez cargada la batería al 100 %, se debe mantener cargada al 100 %. Esto se hace con un voltaje constante y bajo que compense la auto descarga propia de cada batería. En la simulación se modelará esta fase como una fuente de corriente de valor 0 [A], impidiendo la carga o descarga de la batería.



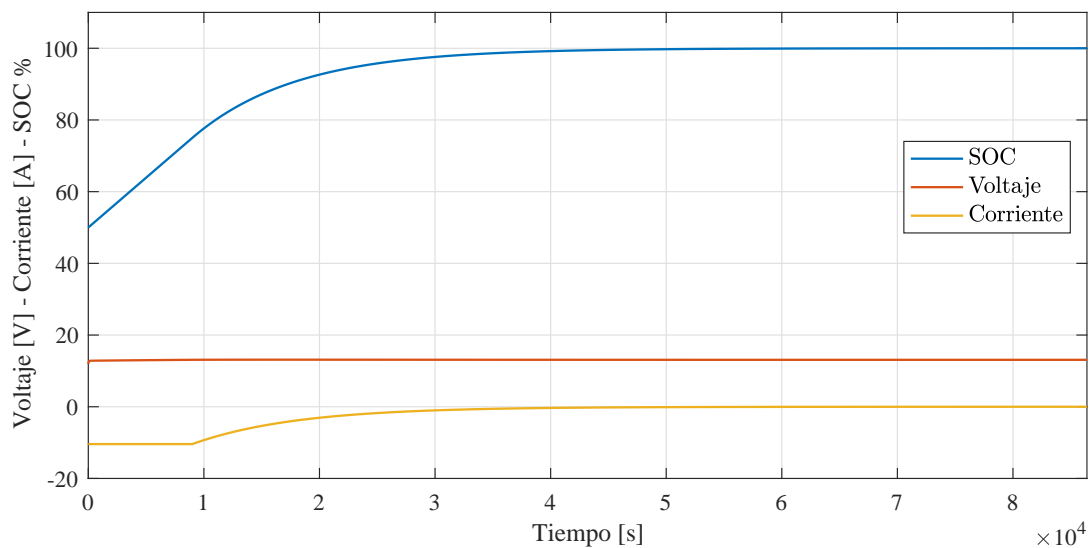
**Figura 4.17:** Curva de carga de batería marca Curtiss Technologies.

Para fines de simular la nano red, el proceso de operación de las baterías en el sistema estará ligada a los procesos de generación y consumo dinámicos descritos en el conjunto de modelos. Es debido a esto que se crea un sub sistema dedicado al proceso de carga y descarga de baterías, en donde además, se divide en dos grupos el set de baterías. Un grupo que consiste en tres baterías y funcionará como un sistema de *Storage* que operará en caso de que la nano red requiera energía en un determinado momento, este sistema *Storage* también tendrá una limitación en el SOC para los procesos de carga y descarga mejorando así su vida útil. Por otro lado se tiene el grupo *Backup* conformado por una sola batería, que estará conectada a la nano red en todo momento para soportar las contingencias en una primera instancia, mientras actúa el sistema de control de la nano red para resolver el problema. El conjunto de baterías es simulado en SIMULINK según se observa en la Figura 4.18, de donde se puede obtener el comportamiento de SOC, corriente y voltaje descritos en las Figuras 4.19 y 4.20 de cada uno de los grupos *Backup* y *Storage* respectivamente.

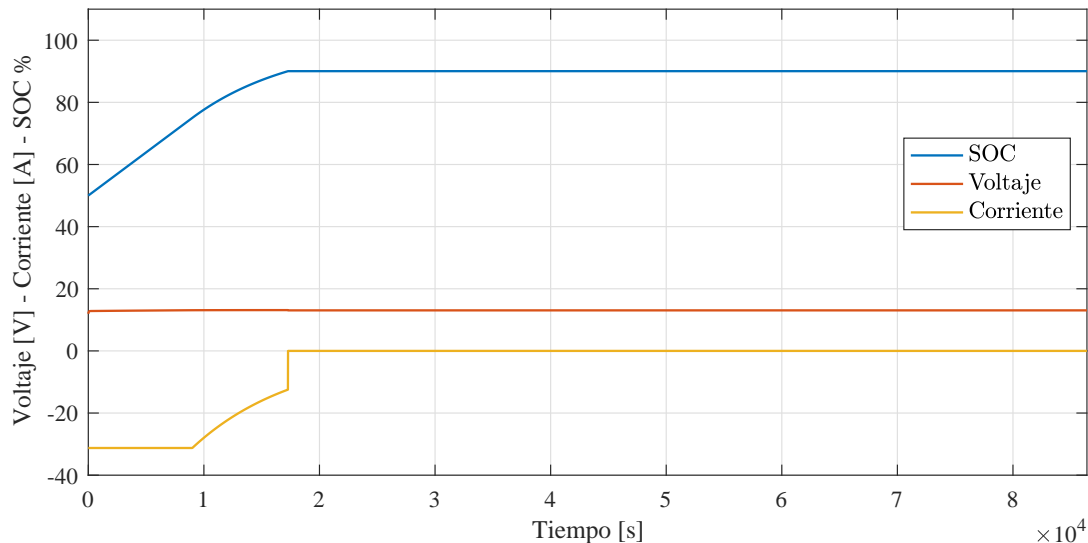


**Figura 4.18:** Simulación en SIMULINK del conjunto de baterías del ESS.

Los códigos de simulación de los bloques *Hysteresis Charge BU*, *Hysteresis Charge ST* y *Battery Current*, están definidos en el Apéndice C, bajo los listing C.8, C.9 y C.10 respectivamente.



*Figura 4.19: Comportamiento de señales en sub sistema Backup.*



*Figura 4.20: Comportamiento de señales en sub sistema Storage.*

## 4.6. Modelo PCC

Para comprender la simulación realizada sobre el punto de conexión con el sistema de distribución local, se debe considerar que la nano red no posee una operación directa sobre la red. Es decir, la única posibilidad de acción que tiene la nano red sobre el PCC es el cierre y apertura de un interruptor independiente, que sirva para entrar y salir del modo islanding, siendo este controlado con el fin de optimizar costos y mejorar la calidad y confiabilidad de la operación en la nano red.

Dentro de la simulación, el PCC es simulado como un switch que puede ser operado por motivos de una falla en la red de distribución, o bien, por acción de la nano red.

## 4.7. Modelo Térmico HVAC

El modelo térmico del sistema HVAC pasa a ser un nuevo concepto dentro de la simulación de la nano red. Este modelo, al no ser eléctrico y no participar en forma directa con la operación del sistema eléctrico de la nano red, debe estudiarse en paralelo, permitiendo que el EMS en desarrollo logre comunicar ambas áreas con el fin de alcanzar su objetivo de control.

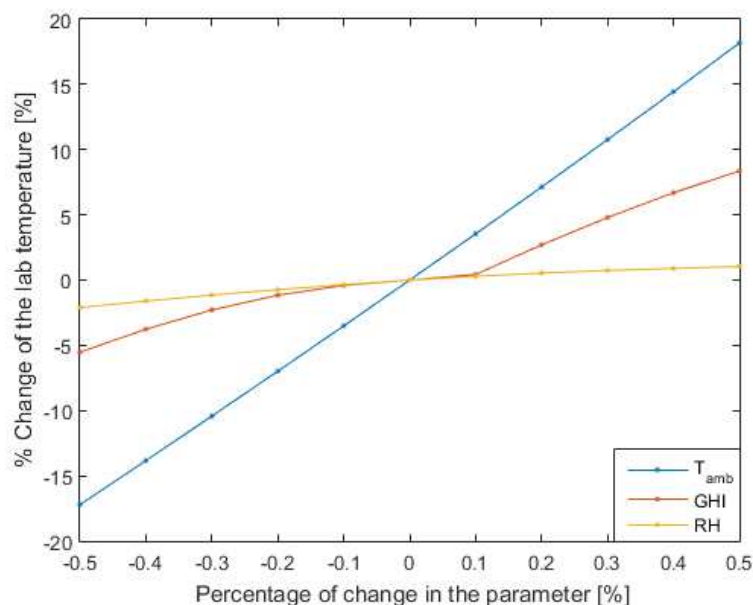
La zona de estudio térmico, del punto de vista físico de la nano red, corresponde a una habitación de  $3,0 \times 10,6 \times 2,6$  [m], ubicada en el segundo piso de un edificio, tal como se proyecta en las imágenes de la Figura 4.1.

Álvaro Valenzuela, en su memoria de titulación [16], realizó el estudio térmico de la zona de estudio, desarrollando un modelo predictivo del comportamiento interno de la temperatura, en función de las variables ambientales al exterior de ella y de las características estructurales del edificio. Este modelo fue desarrollado en el software TRNSYS Simulation Studio, en donde interactúan una serie de *Types* que emulan los fenómenos térmicos que se producen en el entorno de trabajo (su diagrama fue presentado previamente en la Figura 4.2).



El modelo logra obtener el comportamiento predictivo de la temperatura interna con un error porcentual promedio del 7 % con respecto al comportamiento real.

Además, es capaz de determinar la influencia de las variables meteorológicas sobre la variación de temperatura interna dentro de la zona, siendo estas mayores para la temperatura externa y radiación solar y menor para el comportamiento de la humedad relativa, tal como se presenta en la Figura 4.21.



**Figura 4.21:** Análisis de sensibilidad de la temperatura de la zona con respecto a las variables ambientales. [16]

En términos de este trabajo de investigación, para facilitar una futura implementación del sistema de control se simulará el modelo de TRNSYS considerando una humedad relativa constante de 50 %, asumiendo además que este modelo es certero en sus resultados, lo que permitirá diseñar una lógica de control térmico rigurosa en su operación.

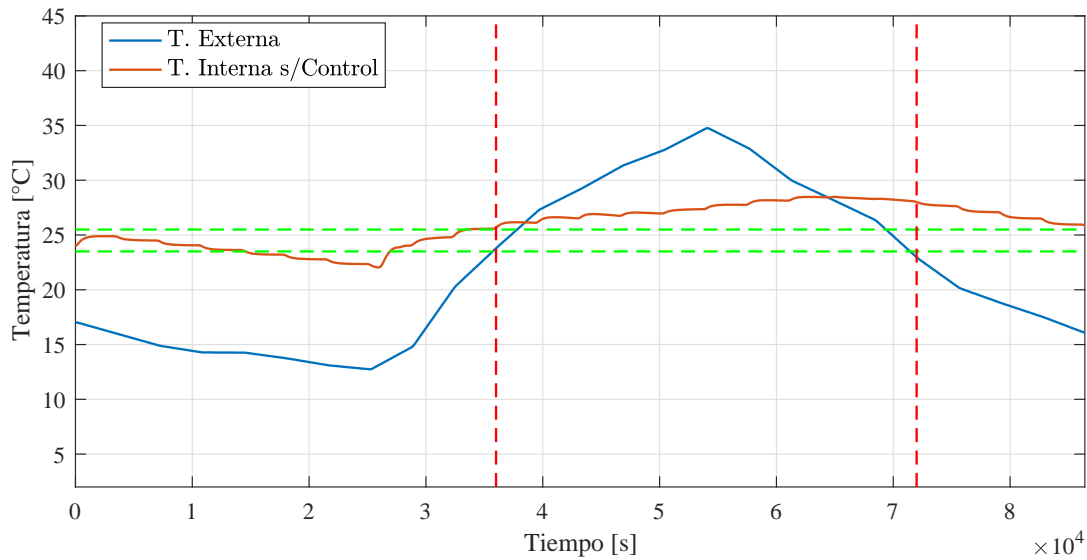
Dado a que el programa en TRNSYS cumple su función en la HP al proyectar cómo se comportará la temperatura al interior de la habitación en función de variables externas durante un día, también es necesario estimar un tiempo de transición para los cambios de temperatura en caso de que se deba encender o apagar el HVAC de forma reactiva, esto para ajuste del control homeostático supervisor.

Objetivamente, en la implementación real bastará con retroalimentar la medición de temperatura en el algoritmo de control y operar el HVAC cuando sea necesario; pero en términos de diseño y simulación, es necesario crear contingencias similares a la realidad para poder evaluar el desempeño de la HP en la nano red de estudio.

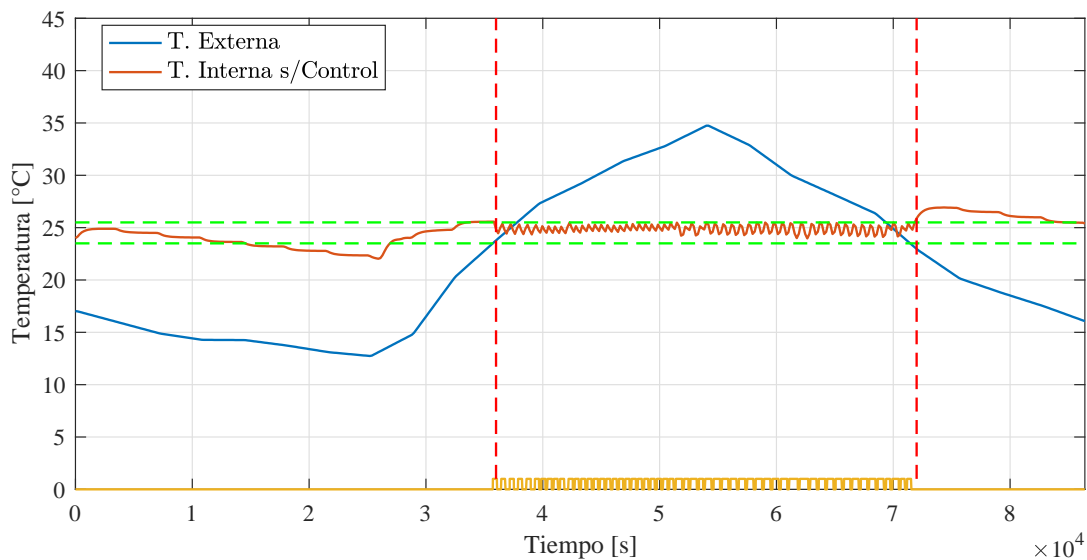
La forma de utilizar el modelo térmico de TRNSYS consiste en llamarlo directamente desde un algoritmo de MATLAB, en donde en base a etapas del diseño del algoritmo de control, existirá una interacción entre los modelos térmico (TRNSYS) y eléctrico (SIMULINK) con el objetivo primario de alcanzar y mantener una temperatura de confort dentro de la habitación en el horario en que esta sea utilizada.

Los inputs que operan el modelo térmico son la temperatura externa de la habitación y la operación definida del equipo HVAC en tiempos y temperatura a alcanzar por este. De este modo, al llamar al sistema térmico se tendrá la temperatura interna proyectada de acuerdo a la operación pre establecida del sistema HVAC.

En términos generales, si se considera un día sin operación del sistema HVAC (fin de semana por ejemplo), el comportamiento interno de la temperatura será como el que se observa en la Figura 4.22. Así mismo, si se considera que el equipo HVAC estará encendido durante todo el horario de oficina (como en la Figura 4.14), su operación y el comportamiento interno de temperatura se comportaran como se presenta en la Figura 4.23.



**Figura 4.22:** Comportamiento de las temperaturas externa e interna sin uso del sistema HVAC.



**Figura 4.23:** Comportamiento de las temperaturas externa e interna con uso del sistema HVAC.

En adición a lo anterior, una de las características interesantes del modelo térmico en una instalación es la capacidad de almacenar energía térmica, mientras que se mantiene un nivel de confort térmico dentro de la habitación. Esta característica está basada en los conceptos de *Tiempo de Retraso* que hace referencia al tiempo que tarda la onda de calor externa en propagarse hacia el interior de la estructura, y el *Factor de Decremento* que expresa la disminución de la onda de calor que ingresa al interior de la estructura [39].

El Tiempo de Retraso se define como:

$$\Phi = t_{T_o}^{max} - t_{T_e}^{max} \text{ If } t_{T_o}^{max} > t_{T_e}^{max} \quad (4.18)$$

$$\Phi = t_{T_o}^{max} - t_{T_e}^{max} + P \text{ If } t_{T_o}^{max} < t_{T_e}^{max} \quad (4.19)$$

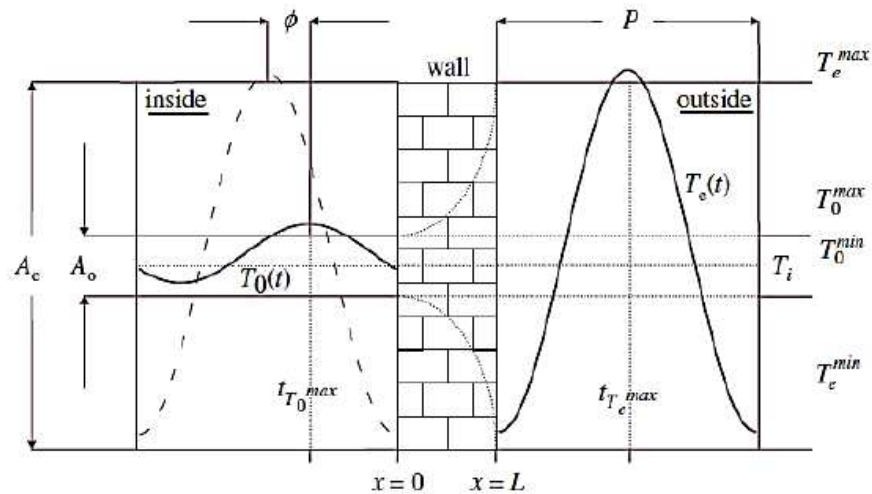
Donde  $t_{T_o}^{max}$  y  $t_{T_e}^{max}$  representan el tiempo en horas cuando las temperaturas en las superficies internas y externas están en sus valores máximos, y  $P$  es el periodo de la onda en 24 hrs.

Por otra parte, el Factor de Decremento se define como:

$$f = \frac{A_o}{A_e} = \frac{T_o^{max} - T_o^{min}}{T_e^{max} - T_e^{min}} \quad (4.20)$$

Donde  $A_o$  y  $A_e$  son las amplitudes de la onda interna y externa a la superficie de la muralla respectivamente.

Tanto la dinámica del Tiempo de Retraso como la del Factor de Decremento, se pueden observar en la Figura 4.24 a continuación:

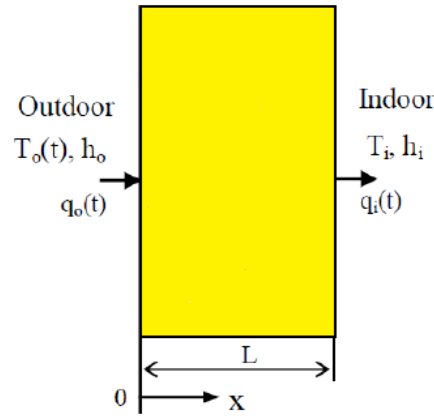


**Figura 4.24:** Esquema representativo del Tiempo de Retraso y el Factor de Decremento. [39]

El transitorio de calor unidimensional presentado sobre una muralla (ver Figura 4.25) se expresa mediante la ecuación general como:

$$K \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} = \rho \cdot C_p \frac{\delta T}{\delta t} \quad (4.21)$$

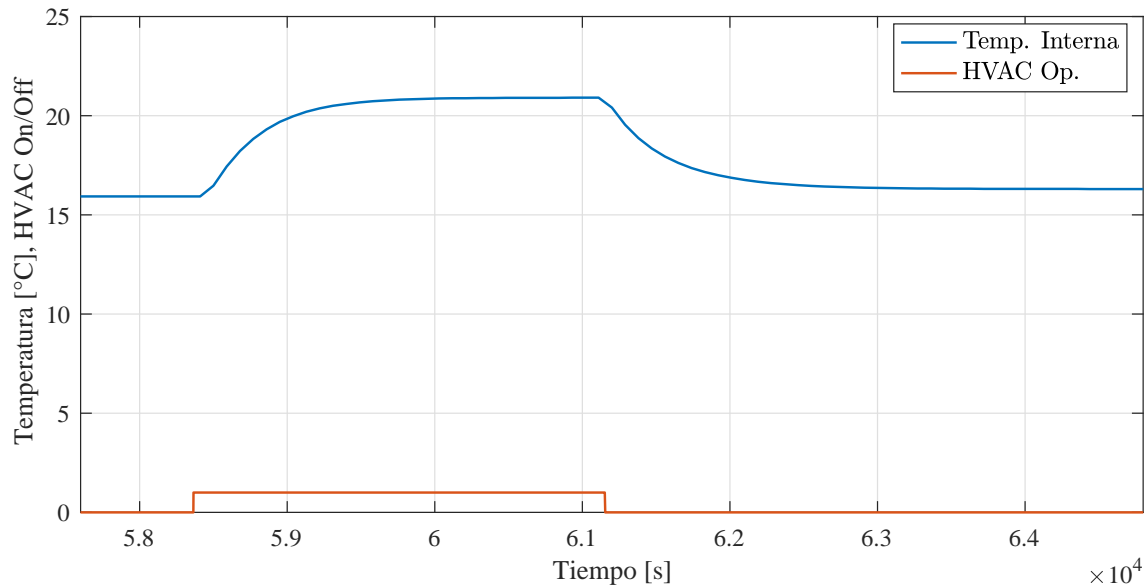
Donde  $K$ ,  $\rho$  y  $C_p$  son la conductividad térmica, la densidad y la capacidad calorífica específica a presión constante de los materiales en la pared de la estructura.



**Figura 4.25:** Transferencia de calor unidimensional. [39]

Ahora bien, estas ecuaciones permiten describir el concepto en términos generales para una pared, en cuanto a la zona de estudio, se habla de una habitación cerrada con ventanas y otros materiales, por lo que el fenómeno estará ligado a más variables y constantes, sin embargo esta ecuación general para el transitorio de calor permite comprender que existe una inercia térmica producto del material y las características físicas estructurales del edificio.

Una manera de observar este fenómeno en la zona de investigación es la de evaluar el modelo térmico aplicando una temperatura externa constante y una temperatura interna que va a depender netamente del uso del sistema HVAC como se presenta en la Figura 4.26 a continuación:



**Figura 4.26:** Carga y descarga térmica en nodo de estudio.

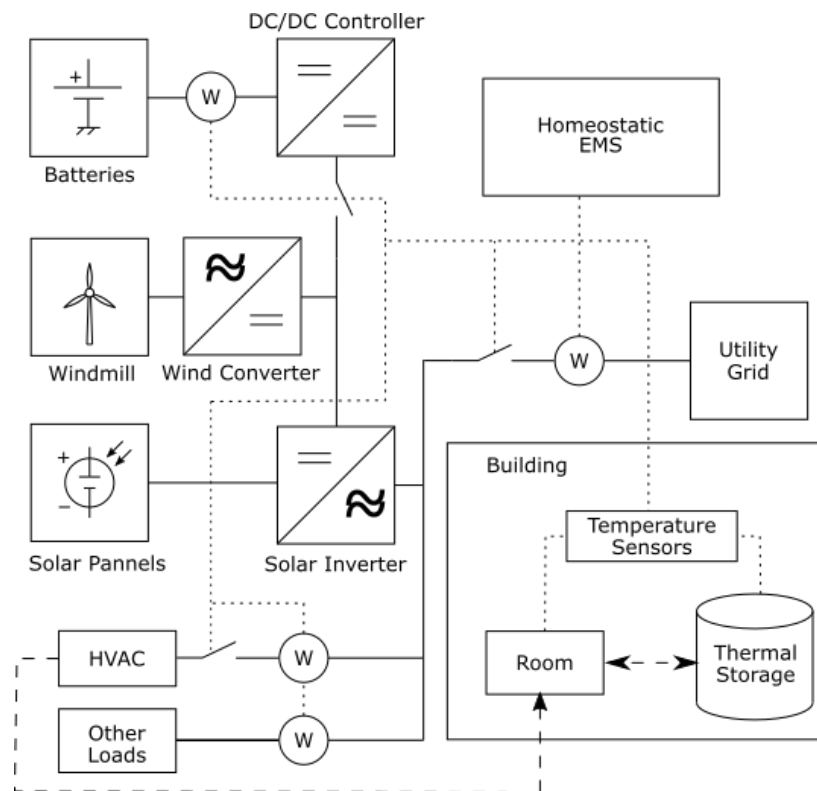
Para esta evaluación, se mantuvo una temperatura inicial de  $15,93^{\circ}\text{C}$ , que aumentó hasta alcanzar una temperatura de  $20,91^{\circ}\text{C}$  post transitorio y que al momento de apagar el sistema HVAC, disminuyó hasta el valor de  $16,30^{\circ}\text{C}$ . Si bien este gráfico sirve para introducir al lector en el fenómeno del almacenamiento térmico, para fines de esta investigación se evaluará el desempeño de almacenamiento en base a la simulación, dejando su investigación y estudio en profundidad para trabajos posteriores.

## 4.8. Modelo EMS

El modelo del EMS responde a la lógica de control supervisor que tendrá la nano red, en base al control homeostático reactivo y predictivo. Para su diseño, primero se debe definir cuál es el objetivo del sistema de control en la operación de la nano red, para luego optimizar tal operación manteniendo la estabilidad, calidad, confiabilidad y flexibilidad dentro de la nano red.

Para fines de la investigación, se plantea el uso de un control supervisor capaz de coordinar los procesos dentro de la nano red buscando mantener el confort térmico al interior de la habitación durante las horas de uso diario de esta. El horario de oficina quedó establecido entre las 10:00 y las 20:00 hrs en días de semana según el apartado 3.4.

Para modelarlo, primeramente es necesario tener claridad de la distribución de equipos y conexiones que posee la nano red, proponiendo posteriormente una red de medición y monitoreo de variables eléctricas para el EMS, junto a la capacidad de operar interruptores para conexión y desconexión de componentes que permitan gestionar la energía eléctrica de la nano red.

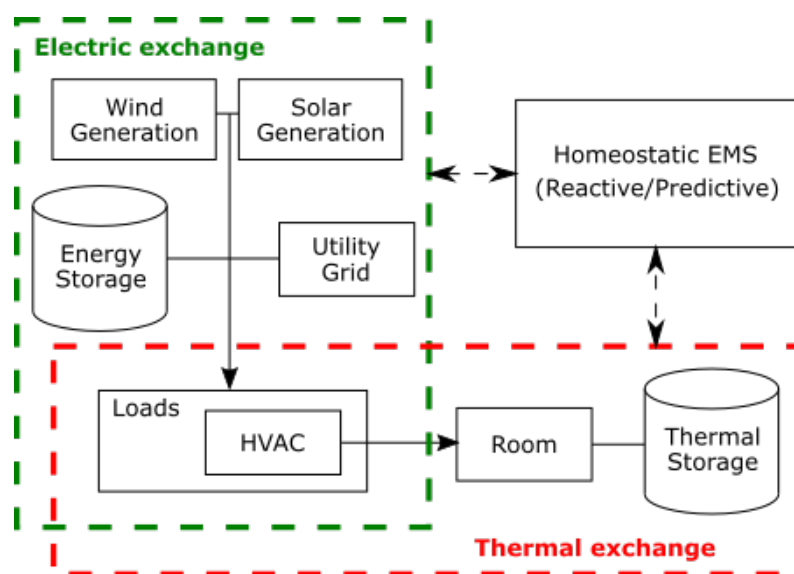


*Figura 4.27: Esquema general de monitoreo y operación de interruptores en nano red.*

La distribución de equipos, junto con la red de medición eléctrica y los interruptores, son presentados en la Figura 4.27. De esta red de medición y operación del EMS, se definen tres dispositivos de conexión y desconexión de componentes, instalados en:

- Baterías: El sistema separa únicamente tres baterías consideradas como grupo Storage definido en 4.5.
- Equipo HVAC: Permite gestionar las cargas con el fin de cumplir el confort térmico, o en caso de ausencia de energía eléctrica, evitar la desestabilidad de la nano red.
- Utility Grid: Genera la capacidad de conectarse y desconectarse de la red de distribución, permitiendo que el sistema sea On/Off Grid.

Dentro de los procesos de gestión de energía se pueden observar procesos térmicos y eléctricos controlados por el EMS, los cuales interactúan entre sí. De esta forma el proceso de gestión de energía se torna más complejo a la hora de implementarse su automatización mediante un sistema de control. Es posible diferenciar ambos procesos según como se observa en la Figura 4.28.



**Figura 4.28:** Proceso térmico y eléctrico al interior de la nano red.

Posteriormente, se debe diferenciar para el diseño del algoritmo de control que operará por homeostasis, los procesos reactivos y los predictivos de nuestro EMS. Para ello, se analiza la propuesta y objetivo del EMS, la cual consiste en mantener el confort térmico al interior de la habitación durante el horario de oficina, por lo que se deberá tener una visión futura de la temperatura, procurando mantener el confort térmico a toda hora establecida por el horario de oficina por acción de la gestión de energía en la nano red.

La lógica de control ejecutada por el EMS, describiendo sus procesos reactivos y predictivos, se compone de acuerdo al esquema presentado en la Figura 4.29. Esta será la lógica a diseñar en el software de simulación SIMULINK para estudiar y evaluar su desempeño en la nano red de estudio.

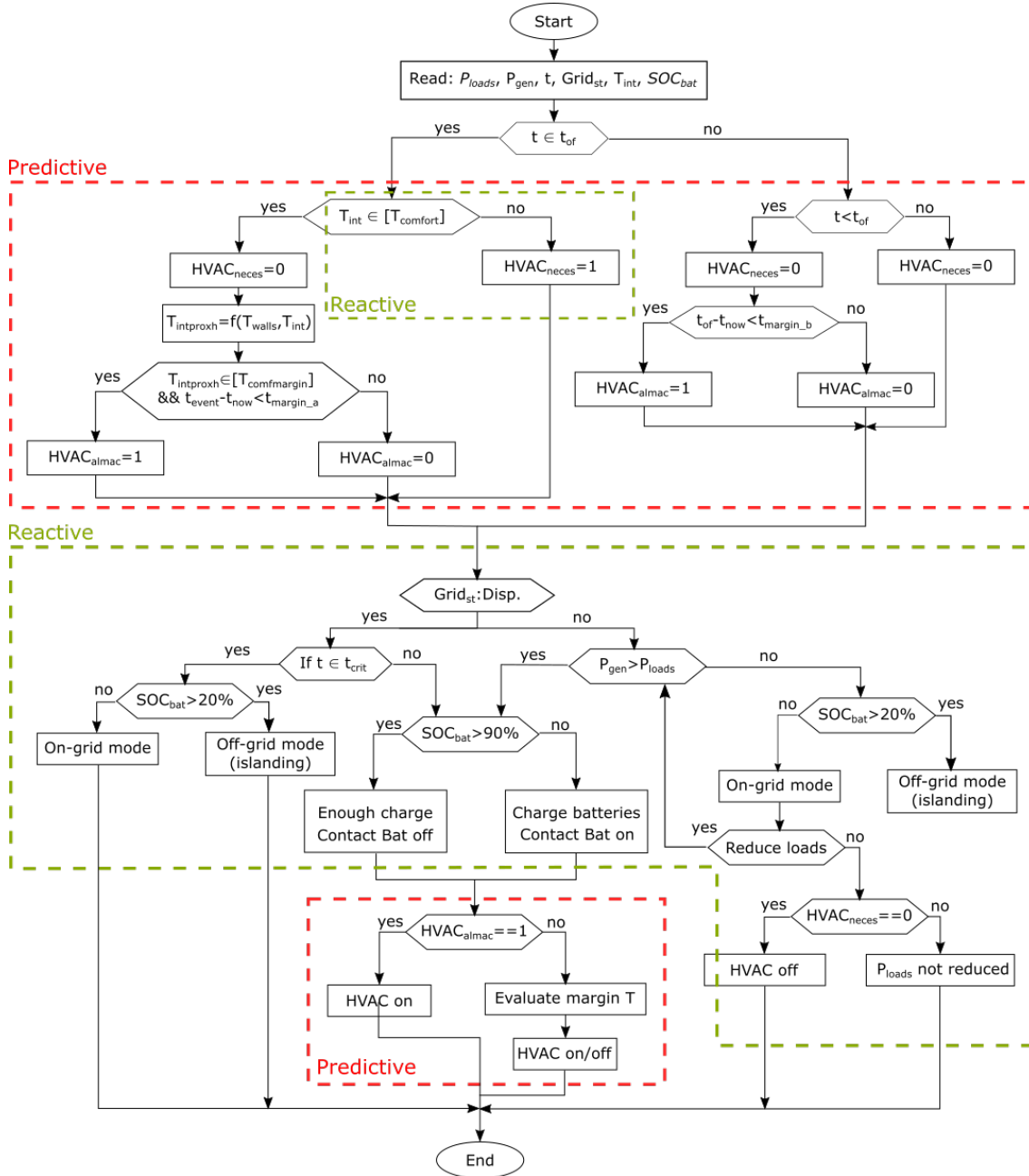


Figura 4.29: Esquema de control homeostático del EMS.

Las variables consideradas en el esquema son:

- $P_{loads}$ : Potencia instantánea consumida por las cargas.
- $P_{gen}$ : Potencia instantánea generada por el sistema DER.
- $t$ : Tiempo de evaluación.
- $Grid_{st}$ : Estado de la red.
- $T_{int}$ : Temperatura interna.

- $SOC_{bat}$ : Estado de carga de las baterías.
- $t_{of}$ : tiempo entre las 10:00 y 20:00 horas (horario de oficina).
- $HVAC_{neces}$ : Se necesita operar el sistema HVAC.
- $HVAC_{almac}$ : Es posible utilizar almacenamiento térmico.
- $t_{now}$ : Tiempo instantáneo de evaluación.
- $T_{comfort}$ : Temperatura de confort térmico.
- $T_{intproxh}$ : Temperatura en el próximo periodo de evaluación.
- $T_{walls}$ : Temperatura en paredes internas.
- $T_{comfmargin}$ : Límites de temperatura de confort térmico.
- $t_{event}$ : Instante de tiempo de algún evento de interés.
- $t_{margin_a}$ : Tiempo necesario para alcanzar confort considerando un evento  $a$  (por definir a elección del programador).
- $t_{margin_b}$ : Tiempo necesario para alcanzar confort considerando un evento  $b$  (inicio horario de oficina).
- $t_{crit}$ : Tiempo en donde se prefiere no consumir energía de la red (pensado en el horario punta).



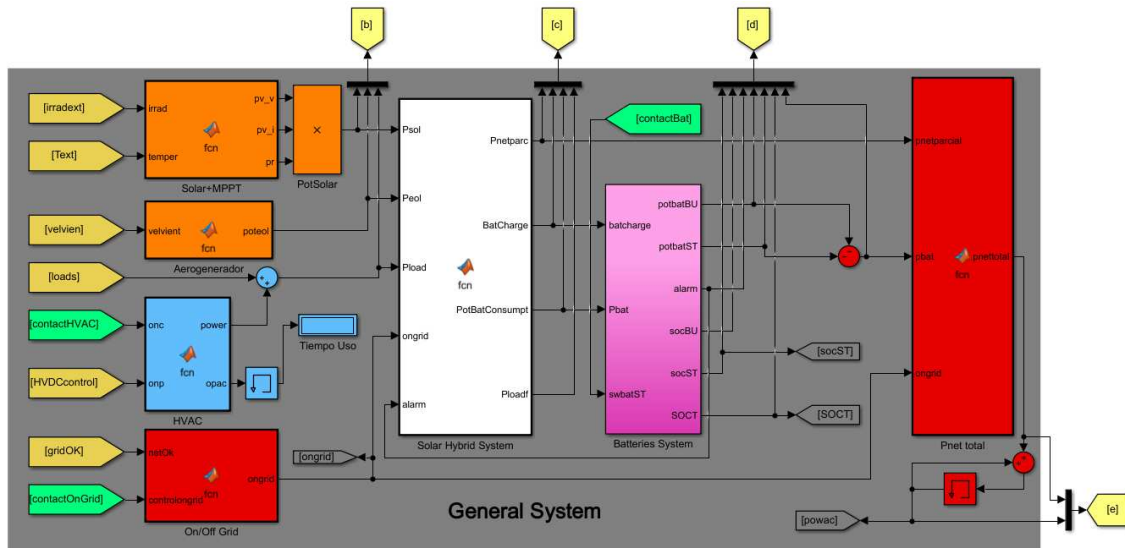
## 4.9. Modelo general de la nano red - Homeostasis Reactiva

Considerando todos los modelos presentados en este capítulo, se procede finalmente a diseñar un esquema de simulación en SIMULINK que unifique todos los componentes de la nano red, cuya operación de la energía se base en una homeostasis reactiva para todos los procesos eléctricos.

Para gestionar la energía dentro de la nano red evaluando su desempeño durante la operación de un día completo, se opta por diseñar un sistema que evalúe flujos de potencia dentro de la nano red, sin considerar parámetros de tensión y corriente, los cuales deberán estar regulados por la operación de los distintos componentes que interactúan.

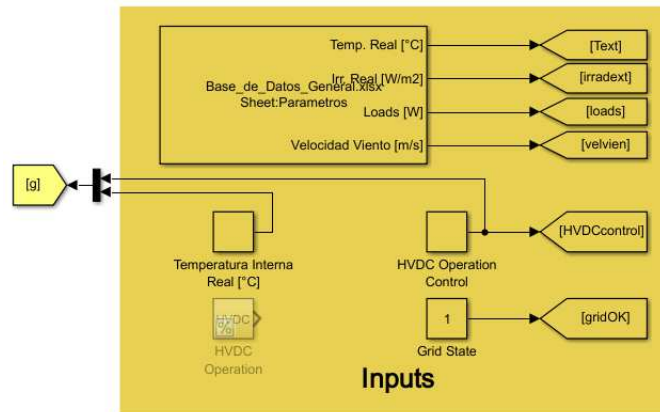
De este modo, se comprende que la generación renovable funcionará como primer recurso para alimentar las cargas al interior de la nano red, para luego, en caso de que exista un margen de energía, esta pueda utilizarse para cargar las baterías. Del mismo modo, en caso de no ser suficiente la energía del sistema DER para alimentar las cargas o cargar las baterías, se deberá suministrar energía desde la red de distribución a la nano red para suplir este déficit, asegurando así la alimentación de las cargas y el almacenamiento de energía en las baterías.

Dentro del software SIMULINK, se diseña un sistema de bloques denominado *General System*, el cual se encarga de efectuar el flujo de potencia en base a los componentes de la red que se encuentran interconectados en cada momento. Este sistema de bloques es presentado en la Figura 4.30.



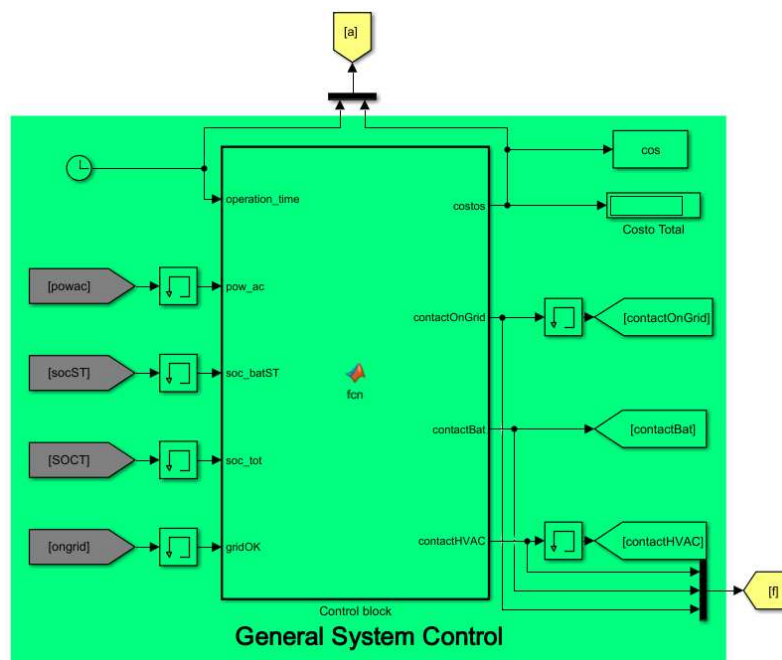
**Figura 4.30:** Sistema de bloques *General System*.

*General System* a su vez, para operar, depende de una serie de entradas que corresponden a los parámetros de interés definidos en el apartado 3.1 anteriormente. Estas entradas son definidas en el sistema de bloques *Inputs*, el cual se presenta en la Figura 4.31.



**Figura 4.31:** Sistema de bloques Inputs.

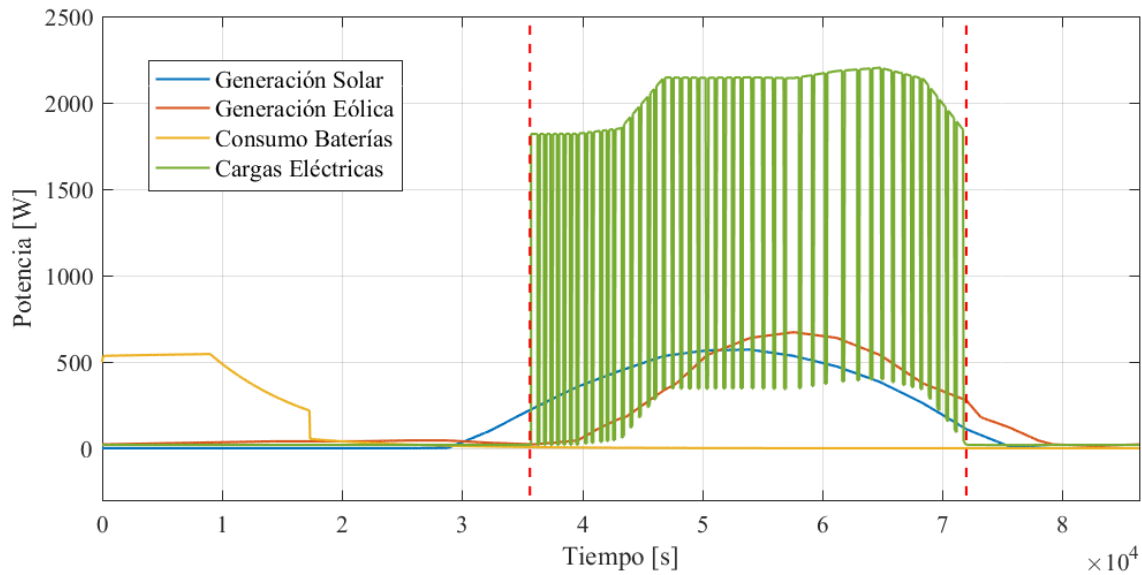
Por último se define el sistema *General System Control* el cual estará a cargo de la operación del EMS y tendrá control sobre el cierre y apertura de los interruptores dentro de la nano red. A continuación se presenta su diagrama de bloques en la Figura 4.32.



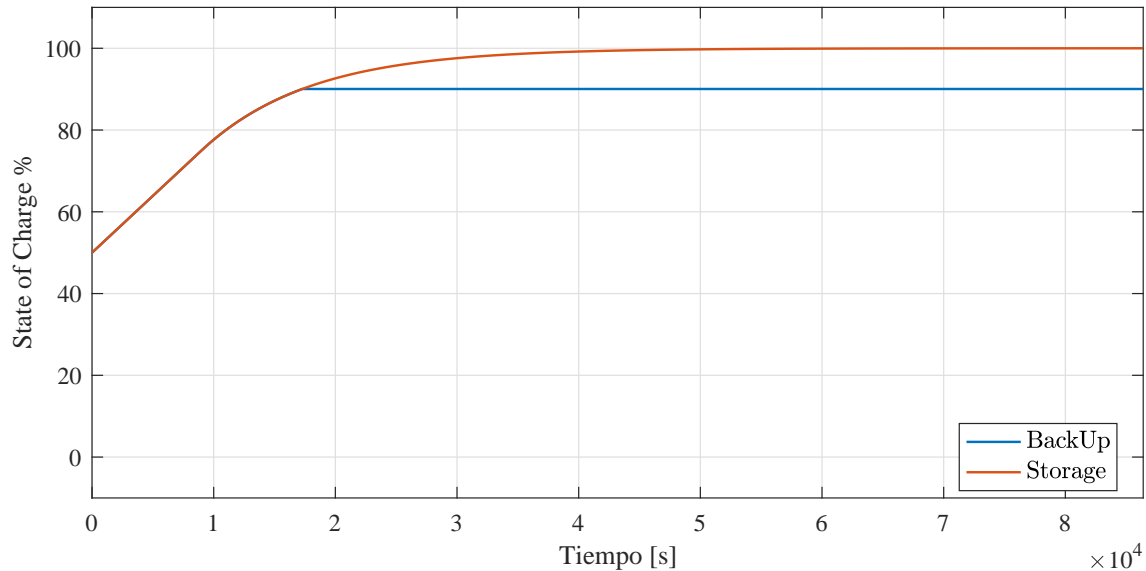
**Figura 4.32:** Sistema de bloques General System Control.

Mediante este esquema de simulación, se procedió a evaluar la operación de la nano red de estudio en un día laboral, considerando que el sistema HVAC se encuentra operativo bajo un régimen regular de acuerdo a las mediciones por minuto que se realizaron durante los diferentes mecanismos descritos en el capítulo de Metodología de Medición y Obtención de Datos 3 para el día 13/02/2018. Esta simulación comprende el mismo comportamiento meteorológico estudiado en el Modelo de cargas eléctricas (Loads) 4.4, por lo tanto, la misma operación del sistema HVAC. Por otra parte, la simulación considera que el ESS no es utilizado en ningún momento salvo por su proceso de carga inicial de las baterías.

De la simulación realizada, se estudia el comportamiento de potencia de los componentes en la nano red, junto con el estado de carga de los grupos Storage y Backup de las baterías. A continuación se presentan los resultados de simulación en las Figuras 4.33 y 4.34 con el respectivo flujo de potencias y proceso de carga de las baterías.



**Figura 4.33:** Flujo de potencia en la nano red para el día 13/02/2018.



**Figura 4.34:** Carga de las baterías.

*Nota: Los códigos asociados a los bloques que se encuentran en cada uno de los sistemas de bloques, son incluidos en el Apéndice, apartado C.*

## 4.10. Modelo general de la nano red - Homeostasis Predictiva

Una vez definido el modelo para la Homeostasis Reactiva, se pretende incluir el uso del modelo térmico diseñado en el entorno TRNSYS, el cual obtiene el comportamiento interno de temperatura de la habitación de estudio conociendo el comportamiento de la temperatura externa, radiación y humedad relativa.

El objetivo será incluir ambos entornos, SIMULINK y TRNSYS, en un algoritmo base desarrollado en MATLAB, que compondrá el modelo de la Homeostasis Predictiva y evaluará el sistema en forma Reactiva de acuerdo a los resultados obtenidos.

Para obtener la temperatura en TRNSYS del día de simulación, lo primero será conocer cómo se comportará la temperatura externa previo a la implementación de las diferentes mejoras programadas en la nano red. Se determinan dos mecanismos para cumplir esta función:

- **Base de Datos:** El uso de una base de datos de información meteorológica de la zona, que podrá ser actualizada de acuerdo a las mediciones que se irán realizando durante el tiempo de operación del algoritmo de control.
- **App Meteorológica:** El uso de una aplicación o página web que presente el comportamiento meteorológico predictivo de la zona de estudio. En este caso también se podrá tener una base de datos de información, pero el control dependerá netamente de la información entregada por la App y de la presencia de conexión a la red.

Una de las cualidades de utilizar una base de datos de información para proyectar el comportamiento esperado de variables en un día, es que esta puede ser actualizada periódicamente con las mediciones diarias de temperatura, permitiendo que el esquema de control sea capaz de aprender de tal información. Esta cualidad no es un objetivo en esta investigación, sin embargo se abre la brecha de estudio para investigaciones futuro sobre el *Machine Learning*. Otra cualidad que posee el uso de base de datos es la independencia de conexión a la red, lo que permite que el algoritmo siga funcionando siempre y cuando haya electricidad.

Por otro lado la gran desventaja de utilizar una base de datos, es que no existe una verdadera certeza de que sus valores predictivos sean cercanos a lo que ocurra realmente, debido a que son valor medidos en tiempo pasado y las condiciones meteorológicas no son valores replicables en el tiempo.

Las cualidades mencionadas para el uso de una base de datos no son replicables para el uso de una App Meteorológica, pero bien es posible utilizar en la implementación ambos mecanismos, en modo de optimizar los resultados obtenidos por el sistema de control.

La App Meteorológica por lo general tenderá a tener valores mucho más certeros a la realidad, dado a que son predicciones que se desarrollan al paso del tiempo. Sin embargo, su gran defecto reside en la dependencia absoluta a una conexión a la red, puesto a que sus parámetros son obtenidos desde un centro meteorológico que se encarga de predecir las condiciones ambientales día a día.

Una vez conocidas las condiciones meteorológicas predictivas, se crea una secuencia lógica de operación para obtener el esquema de operación del sistema HVAC en MATLAB, la cual se define por etapas, de la siguiente manera:

- **Inicio del programa:** Se define el día de simulación del esquema de control.
- **Primera Etapa - Obtención del comportamiento de temperatura interna:** A partir del comportamiento esperado de temperatura externa en el día de evaluación, se obtiene la temperatura interna esperada al interior de la habitación con el modelo térmico en TRNSYS.
- **Segunda Etapa - Cálculo de una lógica de control para el aire acondicionado pre horario de oficina:** Se determina mediante simulación y en base a la información presentada en la Primera Etapa, el instante y la operación del sistema HVAC para que al momento de iniciar el horario laboral, se tenga temperatura de confort al interior de la habitación.
- **Tercera Etapa - Cálculo de una lógica de control para el aire acondicionado en horario de oficina pre evento:** Se simula en forma predictiva una lógica de operación del sistema HVAC, con el fin de obtener la temperatura al interior de la habitación antes de un evento en que se requiere alterar el comportamiento del sistema HVAC disminuyendo o aumentando su utilización para disminuir o aumentar su consumo eléctrico.
- **Cuarta Etapa - Simulación de la operación del día:** Finalmente se simula la operación del día, considerando los resultados alcanzados en la Segunda y Cuarta Etapa. Para la operación definitiva, se añade en MATLAB un proceso iterativo entre la gestión del sistema HVAC, para mantener confort dentro de la habitación, y obtención de los resultados eléctricos a partir del modelo en SIMULINK.
- **Quinta Etapa - Proceso de actualización de datos:** Con las mediciones meteorológicas de cada día, se actualiza la base de datos para estudios predictivos.

Los códigos de simulación de las etapas previamente presentadas, son incluidos en el Apéndice, apartado C, bajo el listing C.11.

# Capítulo 5

## Caso de Estudio y Técnicas de Análisis

En este capítulo se proponen y especifican los comportamientos de la nano red para diferentes casos de estudio, definiendo previamente un sistema tarifario para la operación del sistema y los rangos de temperatura para el confort térmico.

### 5.1. Sistema tarifario

Una de las aristas de evaluación del diseño de una lógica de control por homeostasis, es la evaluación económica del uso del sistema HVAC en función de su operación planificada previamente en forma predictiva, o bien, ejecutada en forma reactiva durante el horario de oficina como se realiza comunmente (HVAC encendido durante toda la jornada).

La nano red de estudio se encuentra inmersa en un edificio tarifado bajo la categoría AT 4.3. La tarifa AT 4.3 corresponde a una tarifa horaria para clientes regulados que se encuentran conectados a la red de distribución en un empalme cuya tensión es superior a los 400V [37].

En la tarifa AT 4.3, se define una serie de costos asociados a la administración del servicio, los cargos de Transporte de energía, el cargo por energía suministrada y cargos asociados a la demanda máxima de potencia. Para fines de esta investigación, la tarifa relevante para el estudio es el valor del suministro de energía, siendo este, la suma de todos los cargos calculados en función de la energía (en  $kWh$ ) consumida por los clientes (ver Figuras 5.1 y 5.2).

En términos de costos, evaluados en Diciembre del año 2018, el valor neto del suministro de energía en CLP, se obtiene de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}\text{Cargo por servicio público (CSP)} &= 0,392 \text{ \$/kWh} \\ \text{Cargo por transporte (CT)} &= 8,390 \text{ \$/kWh} \\ \text{Cargo por energía (CE)} &= 50,834 \text{ \$/kWh} \\ \text{Cargo por suministro de energía} &= \text{CSP} + \text{CT} + \text{CE} = 59,658 \text{ \$/kWh}\end{aligned}$$

Cargo en Boleta/Factura	RED	ETR	Cargo Decreto Tarifario 11T de 2016	UNIDAD
Administración del servicio (1)	AT_A AT_S	No Aplica	Cargo fijo mensual	(\$/mes)
			Cargo por servicio público	(\$/kWh)
Cargos de Transporte	AT_A AT_S	No Aplica	Cargo por uso de sistema de transmisión	(\$/kWh)
			Cargo transmisión nacional interconexión	(\$/kWh)
			Cargo transmisión zonal sistema C	(\$/kWh)
			Cargo transmisión zonal sistema D	(\$/kWh)
			Cargo transmisión dedicado	(\$/kWh)
			Transporte de electricidad (2)	(\$/kWh)
Cargo por energía (3)	AT_A AT_S	No Aplica	Cargo por energía	(\$/kWh)
Cargos por demanda máxima de potencia (4)	AT_A	No Aplica	Cargo por demanda máxima de potencia suministrada	(\$/kW/mes)
	AT_S			
	AT_A		Cargo por demanda máxima de potencia leída en horas de punta	(\$/kW/mes)
	AT_S			

**Figura 5.1:** Estructura tarifaria de los cargos por suministro de energía. [37]

San Joaquín	
\$ Neto	\$ IVA
670,714	798,150
0,392	-
2,510	2,987
0,780	0,928
0,000	0,000
4,680	5,569
0,420	0,500
8,390	9,984
50,834	60,492
1262,176	1501,990
2077,235	2471,910
4597,622	5471,170
4760,639	5665,160

**Figura 5.2:** Tarifas de Diciembre de 2018 presentadas por Enel Distribución Chile. [37]

### 5.1.1. Bloques tarifarios

Utilizando el modelo de simulación del apartado 4.9, se incorpora el cálculo de costos por suministro de energía en el sistema de bloques General System Control, obteniendo el cobro por energía suministrada desde la red pública en un día normal de operación.

Además, se instaurarán bloques tarifarios durante el día, los cuales son comunmente conocidos por las tarifas de suministro eléctrico flexibles en Chile [37]. Su denominación y definición por bloque es:

- *Punta* - Desde las 18:00 a 22:00 hrs - Recargo de 30 % sobre el cargo por suministro.
- *Día* - Desde las 8:00 a 18:00 hrs - Valor regular del cargo por suministro.
- *Noche* - Desde las 22:00 a 8:00 hrs - Descuento de 30 % sobre el cargo por suministro.

Gracias a estos bloques tarifarios, es posible producir diferentes escenarios de gestión para el algoritmo de control, ya sea por motivo de contingencias o por el objetivo de disminuir los costos de operación de la nano red.

## 5.2. Confort térmico

Por otra parte, desde un inicio se promulgó la idea de diseñar una lógica de control que asegurara el confort térmico al interior de la habitación durante el periodo de uso común de esta.

De acuerdo con la ASHRAE las temperaturas de confort térmico al interior de una oficina para el invierno se encuentran entre los  $21 - 23\text{ }^{\circ}\text{C}$ , mientras que para el verano el rango de temperaturas debe ser entre los  $23,5 - 25,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  [6]

Generalmente el sistema HVAC es utilizado ajustando una temperatura fija de tendencia, lo que produce que el equipo HVAC tienda a permanecer encendido ya sea en estado de espera o intercambiando calor. Debido a esto, existen intervalos de temperatura dentro de los cuales no sería necesario mantener encendido el equipo, ya sea por los tiempos de espera o por el hecho de que el intervalo de confort indicado por la ASHRAE no necesariamente va a ser igual al intervalo interno que poseen los sistemas HVAC.

Es posible ajustar de mejor forma la intensidad de uso del sistema HVAC modificando la temperatura de contienda, o deseada, a la que es sometido a regular el equipo. Pese a esto, es importante mencionar que existe un rango crítico de diferencia entre la temperatura externa y la temperatura de contienda, en donde, pese a mantenerse encendido e intercambiando calor en forma constante, el sistema HVAC no va a lograr alcanzar la temperatura requerida por el usuario (a menos que el sistema sea lo suficientemente robusto).

## 5.3. Casos de estudio

Para poder estudiar el comportamiento del algoritmo de control homeostático, se proponen cinco casos de estudio que permitan evaluar la capacidad de gestión de energía, predicción de variables y seguridad de la nano red, determinando mejoras y eventuales dificultades que pudiera tener el algoritmo de control en su implementación.

Para fines de estudio, se asumirá que las evaluaciones predictivas se realizarán considerando una App Meteorológica 100 % certera en su predicción ambiental, por otro lado, se utilizará la base de datos del Explorador Solar del Ministerio de Energía - Universidad de Chile, cuyos datos abarcan las temperaturas diarias entre los años 2004 y 2016 para la Región Metropolitana, y que serán utilizados para uno de los escenarios de simulación, específicamente, para obtener los valores esperados del día 13/02/2018. Los valores considerados pueden ser leídos en la Tabla B.3 del Apéndice, apartado B.

Además, para el diseño de control del sistema HVAC, se decide usar un paso temporal de  $90[s]$  entre cada decisión de si debe operar o no. Este tiempo es suficiente para determinar una lógica de control cercana a la realidad, pero definitivamente al momento de implementar la lógica de control en la nano red, la operación del sistema HVAC estará sujeta al paso temporal que se le dé a la medición de temperatura interna de la habitación.

A continuación se presentan los cinco casos de estudio para el comportamiento del algoritmo de control homeostático.



### 5.3.1. CASO 1 - Caso Base

El caso base, considera algo similar a la actualidad dentro de la nano red.

- El ESS se encuentra inoperativo salvo al momento en que se produce alguna contingencia en la red de distribución.
- El sistema HVAC tiende a estar encendido durante todo el horario de oficina en sus dos estados de operación, como se describe en el apartado 4.7 del Modelado del Sistema.
- No existe una operación predictiva para tener confort térmico al momento de iniciar el horario laboral. Tampoco existe uso de la inercia térmica para desplazar consumos durante el día.

A partir de esta simulación, se obtendrá el precio base de operación del sistema y tiempo de duración del confort térmico evaluado en % con respecto al tiempo total del horario de oficina. Esta simulación se realizará tanto para la época de verano como para la de invierno. Además tendrá una duración de seis días por época de acuerdo a los datos medidos que se presentan en el apartado 3.4.

Adicionalmente, se incluye el caso particular de simulación del día 13/02/2018 para hacer comparaciones y análisis más finos en cuanto a mejoras en la implementación del algoritmo de control.

### 5.3.2. CASO 2 - Predicción pre horario laboral

El segundo caso de estudio implementa una mejora en la nano red, la cual consiste en el análisis predictivo de la temperatura y el sistema HVAC para alcanzar temperatura de confort al momento de iniciar el horario de oficina. Esta mejora es simulada para el día 13/02/2018, con el fin de estudiar su comportamiento y conocer la respuesta de la nano red ante la gestión de energía.

Esta simulación se realiza tanto con los datos predictivos de temperatura externa de la **App Meteorológica**, como los de la **Base de Datos**. A partir de los resultados, se evaluará la efectividad de cada método predictivo empleado.

### 5.3.3. CASO 3 - Predicción pre aumento tarifario

El tercer caso de estudio implementa otra mejora en la nano red, la cual consiste en el análisis predictivo de la temperatura y el sistema HVAC, segundos antes de entrar al bloque tarifario *punta*. La intención es llevar la temperatura al límite de confort justo en el momento previo al inicio de la tarifa de horario *punta*; de esta forma, se podrá apagar el sistema HVAC por un periodo de máxima extensión posible antes de que la temperatura al interior de la habitación salga del rango de confort. La mejora será analizada para el día 13/02/2018.

Se estudian dos escenarios particulares para esta implementación:

- Simulación con App Meteorológica exigiendo temperatura  $24,5^{\circ}\text{C}$  al inicio del bloque tarifario *punta*.

- Simulación con App Meteorológica exigiendo temperatura  $24,2^{\circ}\text{C}$  al inicio del bloque tarifario *punta*.

El motivo de elección de ambos casos, surge a partir de la experimentación y por lo tanto serán explicados en el capítulo 6.

A partir de los resultados, se evaluará la efectividad de implementar un sistema de almacenamiento térmico como medida para disminuir el uso del sistema HVAC en periodos indeseados.

#### 5.3.4. CASO 4 - Uso de ESS para disminución de costos

Considerando las mejoras con resultados positivos dentro del segundo y tercer caso, se incorpora el uso del ESS al momento del aumento tarifario por bloque *Punta* durante todo el periodo de tiempo restante hasta el término del horario de oficina. Esta aplicación se desarrolla con el fin de disminuir los costos de operación de la nano red del día.

Se simulará esta mejora junto a las anteriores para el día 13/02/2018, y luego, se incluirá a la simulación general de los seis días en la época de verano e invierno (CASO 1), para evaluar su desempeño.

#### 5.3.5. CASO 5 - Contingencias en la red de distribución

Por último, y considerando el cuarto caso en donde el ESS sí tiene participación en la nano red, se simula un apagón en la red de distribución, llevando el consumo de energía de la batería al límite, para evaluar el desempeño del algoritmo de control bajo la perspectiva de mantener la confiabilidad y seguridad de la nano red.

Para llevar a cabo esta contingencia, se simulará un apagón en la red de distribución que comenzará al inicio del horario laboral (10:00 hrs) y terminará a las 16:00 hrs.

Cabe destacar que con este caso se dan por simuladas todas las dinámicas incluidas en el algoritmo de control y gestión de energía. Esta simulación se realizará para el caso particular del día 13/02/2018, dado que no es común que ocurran contingencias en forma periodica, por lo que se descarta la posibilidad de incluir este caso al análisis de seis días.

# Capítulo 6

## Simulaciones y Análisis

En este capítulo se desarrollan y presentan los diferentes resultados obtenidos por simulación, para los casos presentados en el apartado anterior 5.3. Los resultados se presentan bajo diferentes dinámicas con el fin de comparar unos con otros, desde el caso base (caso similar a la actualidad en la nano red) hasta las diferentes mejoras y contingencias que se proponen para el estudio de la nano red.

A partir de los resultados se desarrolla un análisis del comportamiento del EMS y su control por homeostasis. Posteriormente, en el siguiente capítulo, se presentarán conclusiones rescatadas a partir de los análisis aquí presentados, abarcando, mediante ellas, los objetivos presentados inicialmente en este trabajo.

### 6.1. CASO 1 - Caso Base

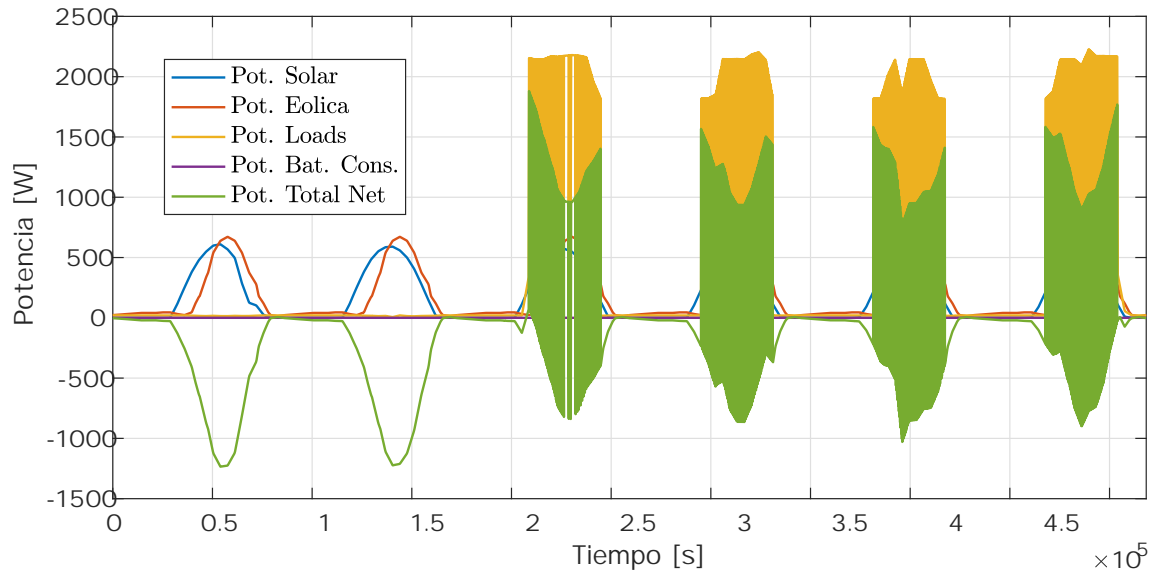
Para la simulación efectuada del caso base, se obtiene primero el comportamiento durante los seis días semanales de verano e invierno, para luego agregar el comportamiento particular del día 13/02/2018 (escogido en forma arbitraria). Los resultados obtenidos se presentan bajo tres dinámicas diferentes:

- Flujo de Potencia.
- Comportamiento de temperaturas y uso de sistema HVAC.
- Estado de carga del ESS.

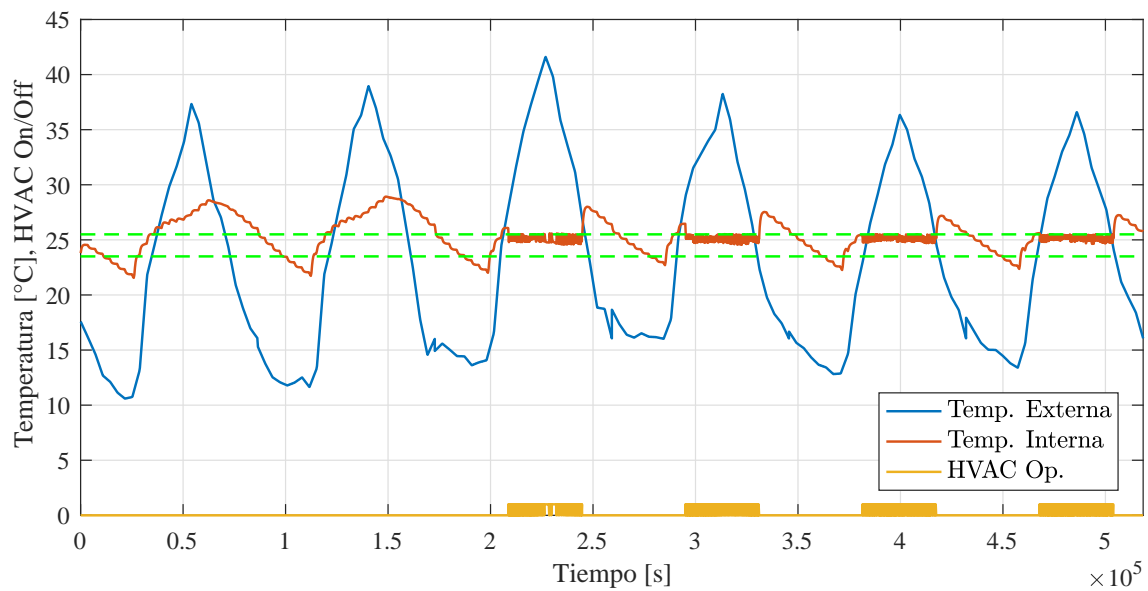
Posteriormente, se obtiene el porcentaje de confort térmico alcanzado durante el periodo considerado como horario de oficina, y los costos asociados a la operación de la nano red en el tiempo de análisis.

#### 6.1.1. Semana Verano

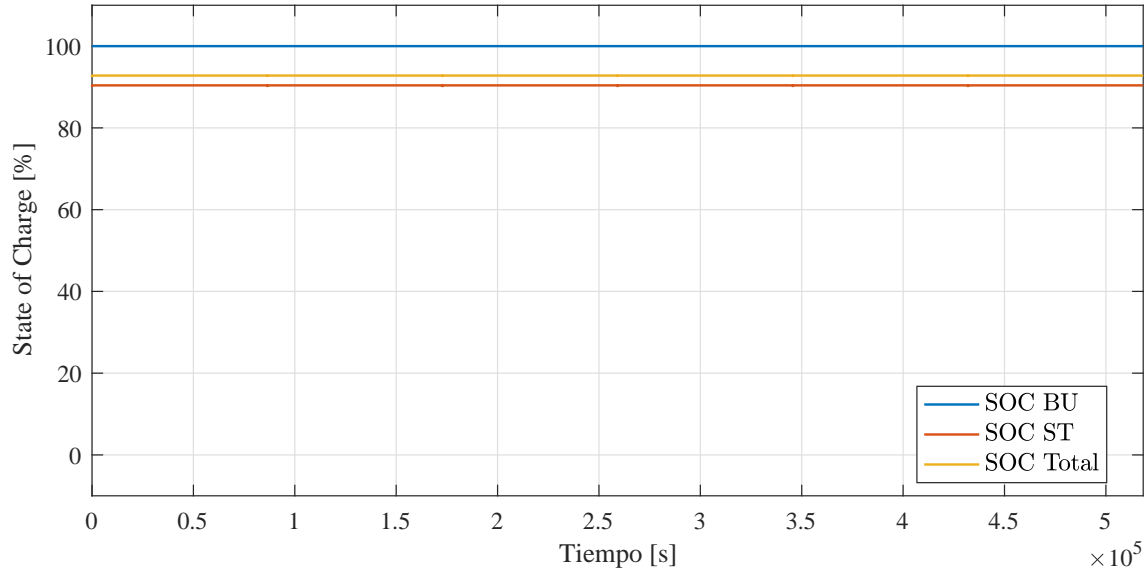
Las dinámicas obtenidas para la semana de verano, se presentan en las Figuras 6.1, 6.2 y 6.3 a continuación:



**Figura 6.1:** Flujo de potencia semana de verano CASO 1.



**Figura 6.2:** Comportamiento de temperaturas y uso de sistema HVAC semana de verano CASO 1.



**Figura 6.3:** Estado de carga del ESS semana de verano CASO 1.

El porcentaje de confort logrado alcanza el valor de:

$$98,91 \%$$

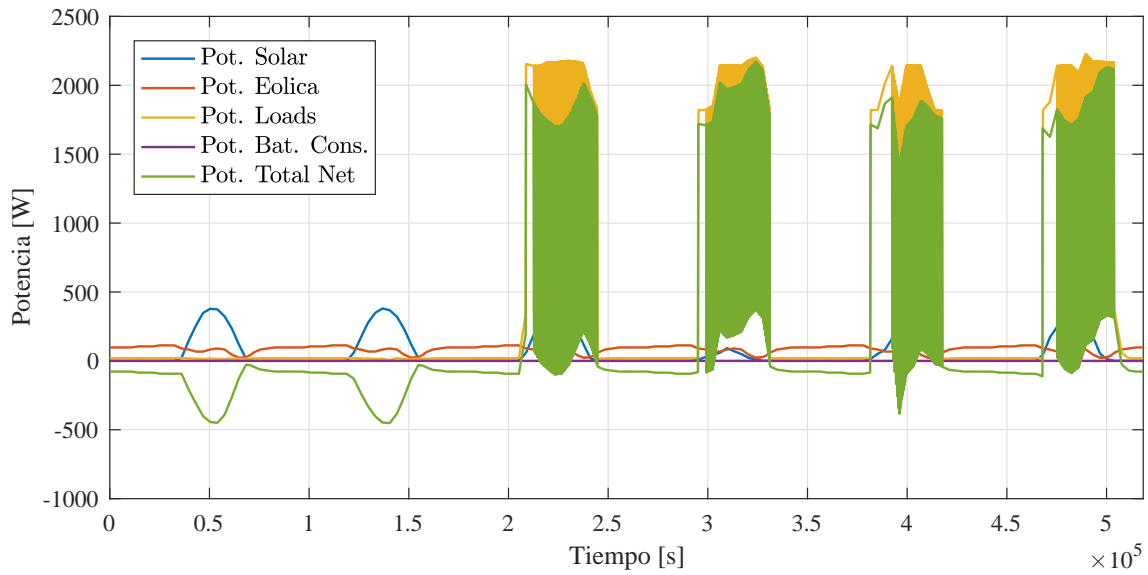
Mientras que el tiempo efectivo de operación del sistema HVAC y los costos totales asociados al sistema fueron respectivamente:

$$102870 [s]$$

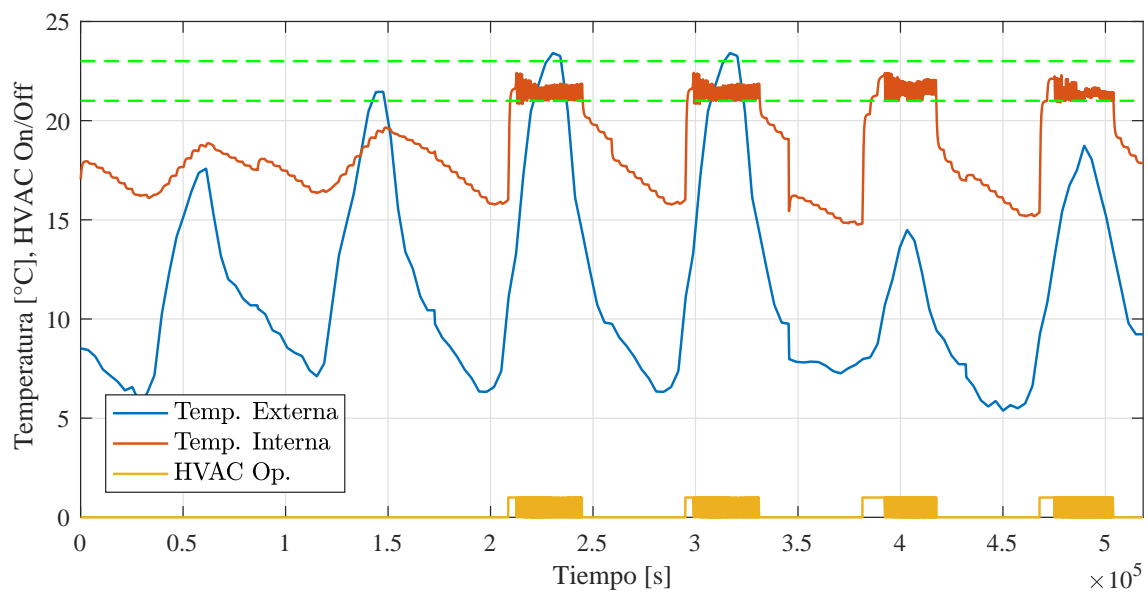
$$606 \$$$

### 6.1.2. Semana Invierno

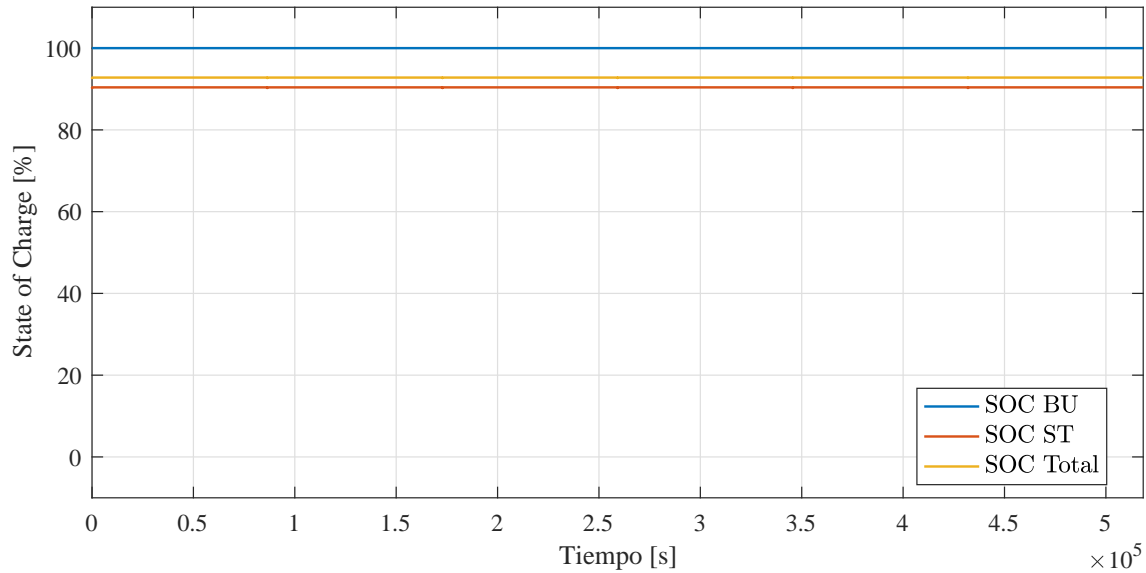
Por su parte, las dinámicas obtenidas para la semana de invierno, se presentan en las Figuras 6.4, 6.5 y 6.6 a continuación:



**Figura 6.4:** Flujo de potencia semana de invierno CASO 1.



**Figura 6.5:** Comportamiento de temperaturas y uso de sistema HVAC semana de invierno CASO 1.



**Figura 6.6:** Estado de carga del ESS semana de invierno CASO 1.

El porcentaje de confort logrado alcanza el valor de:

$$92,44\%$$

Mientras que el tiempo efectivo de operación del sistema HVAC y los costos totales asociados al sistema fueron respectivamente:

$$97020 [s]$$

$$2615 \$$$

### 6.1.3. Análisis entre semanas

Lo primero que se puede observar en los gráficos presentados es que de los seis días considerados, en los dos primeros no se incluye el uso del sistema HVAC, puesto que tales días corresponden a fines de semana (sábado y domingo), por lo que no se considera que hayan personas al interior del recinto en dicho periodo, y por ende, no se requiere la operación del sistema HVAC.

En los gráficos de las Figuras 6.1 y 6.4 es posible reconocer como al momento de operar el sistema HVAC, de curva amarilla con consumo positivo, la potencia solicitada de la red de distribución (Pot. Total Net) reacciona, cubriendo la falta de energía solicitada por las cargas del sistema. Debemos recordar que el sistema DER continúa operando, lo que disminuye la solicitud de energía por parte de la red de distribución. En los instantes en que la potencia de la red pasa a ser negativa, son momentos en los que el consumo es menor a la generación del sistema DER, por lo que se está inyectando energía a la red.

En los gráficos de las Figuras 6.2 y 6.5 se presentan los comportamientos térmicos, denotando en color amarillo los instantes de operación (valor 1) y apagado (valor 0) del sistema HVAC. Las curvas horizontales de color verde, corresponden a los límites de confort en cada caso (verano e invierno), mientras que las curvas azul y roja corresponden a la

temperatura externa e interna a la habitación resultante de la operación del EMS en la nano red.

En los gráficos de las Figuras 6.3 y 6.6 se presenta el comportamiento de carga del ESS basado en baterías, en donde al estar considerando una situación en donde no se utilizan salvo en caso de emergencia, se mantienen con carga completa durante toda la operación.

Por otra parte, en los resultados es posible observar que la semana de invierno alcanza un menor porcentaje de confort, y al mismo tiempo, mayores costos de operación. Esto ocurre producto de que el tiempo de operación que requiere el sistema HVAC, para poder alcanzar el rango de temperaturas de confort térmico, es mayor para los días de invierno. Una forma de comprender el motivo por el que se requiere más tiempo de operación en invierno es la diferencia promedio que existe entre el rango de confort térmico de temperatura y el valor inicial de temperatura en horario de oficina al interior de la habitación. En verano se registra una diferencia promedio de  $0,400\text{ }^{\circ}\text{C}$ , mientras que en invierno la diferencia es mayor, alcanzando un valor promedio de  $5,065\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Debido a esta diferencia, el flujo de calor requerido en invierno para alcanzar la temperatura de confort es mayor, lo que se ve reflejado en un mayor tiempo de actuación del sistema HVAC al inicio del horario de oficina (consumo constante). Este fenómeno se puede verificar en las Figuras 6.4 y 6.5.

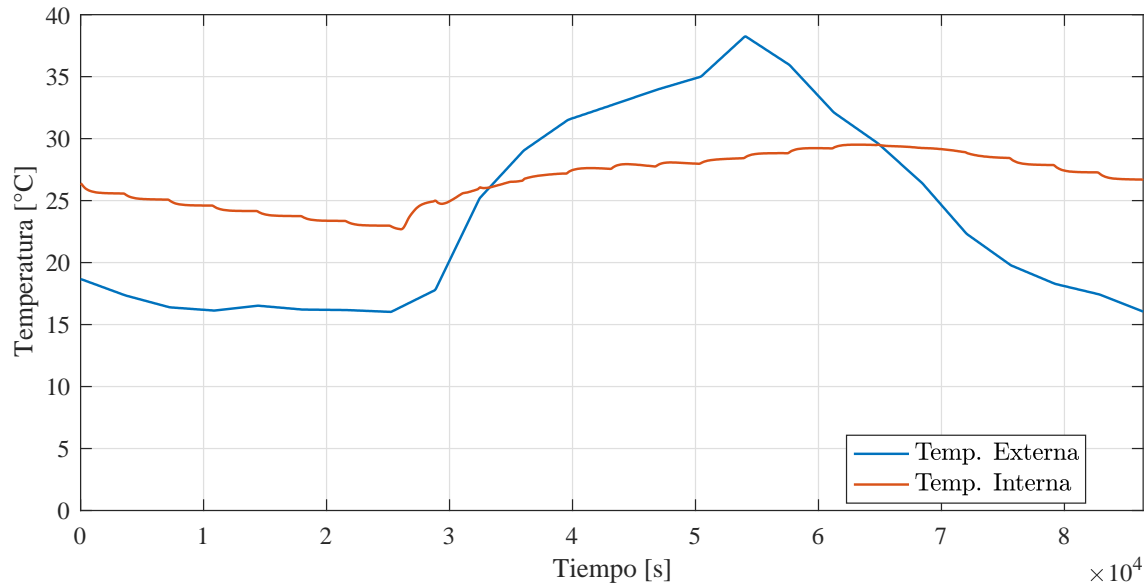
Por último, cabe destacar que los resultados presentados para ambas semanas, representan la situación actual de la nano red. Será a partir de estos resultados que se implementarán diferentes mejoras y se evaluará la operación del control homeostático.

#### **6.1.4. Día base de operación 13/02/2018**

Con el fin de tener un análisis más fino del sistema de control, se simula y presentan los resultados del día particular 13/02/2018, el cual corresponderá a la base de estudios diarios en simulaciones posteriores.

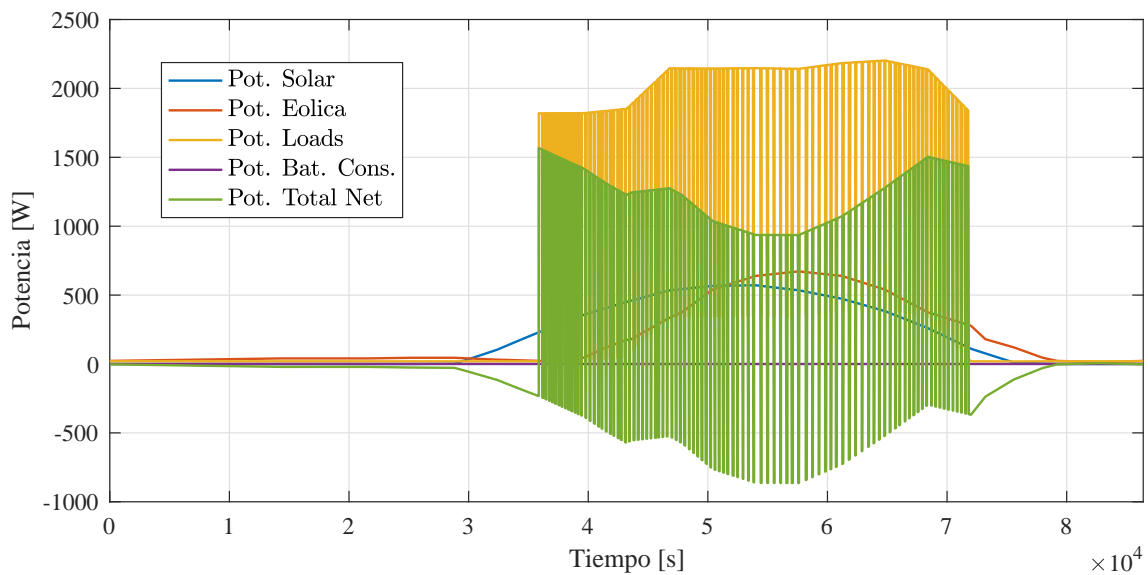
Primero es necesario conocer el comportamiento de la temperatura sin uso del sistema HVAC, al interior de la habitación. Su comportamiento se presenta en la 6.7, y servirá para reconocer mejor los diferentes fenómenos que se evaluarán durante este capítulo.



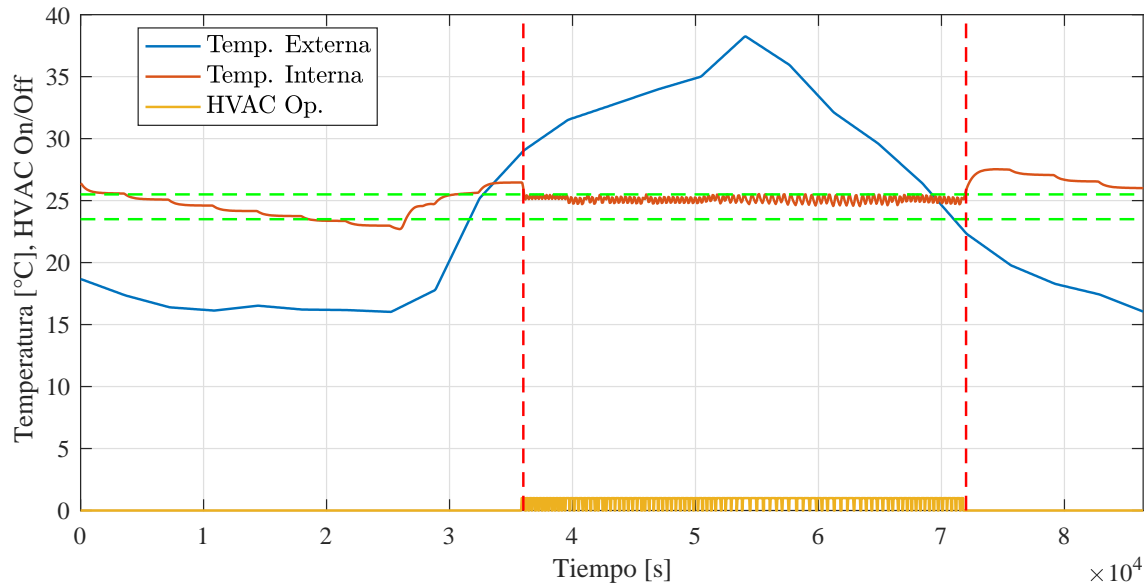


**Figura 6.7:** Comportamiento de temperaturas sin uso del sistema HVAC 13/02/2018.

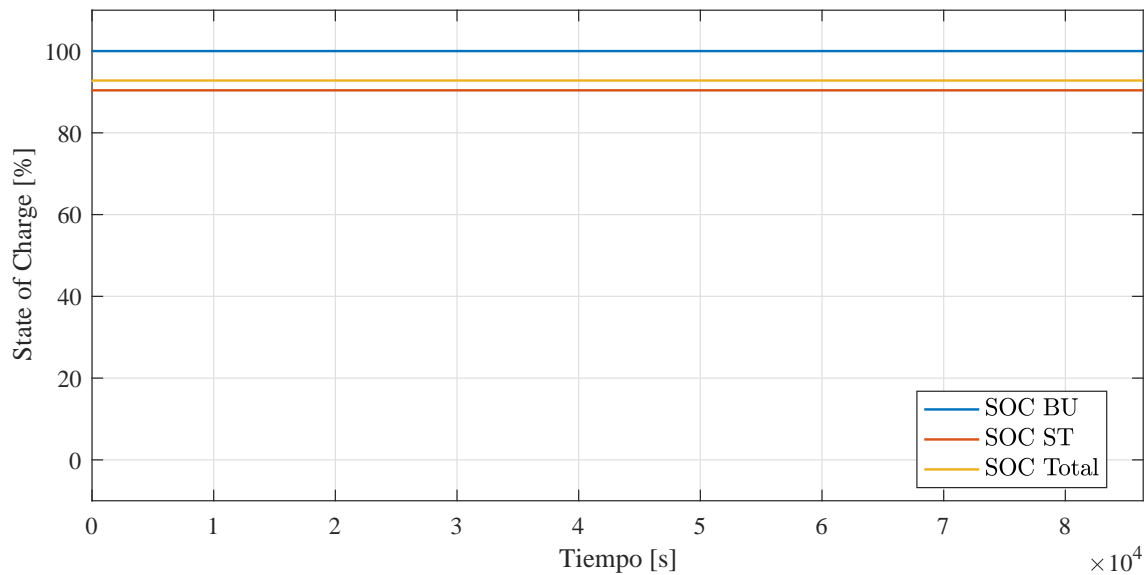
Posteriormente, las tres dinámicas obtenidas para el día 13/02/2018, se presentan en las Figuras 6.8, 6.9 y 6.10 a continuación:



**Figura 6.8:** Flujo de potencia 13/02/2018 CASO 1.



**Figura 6.9:** Comportamiento de temperaturas y uso de sistema HVAC 13/02/2018 CASO 1.



**Figura 6.10:** Estado de carga del ESS 13/02/2018 CASO 1.

El porcentaje de confort obtenido alcanza el valor de:

$$98,91 \%$$

Y el tiempo efectivo de operación del sistema HVAC y los costos totales asociados al sistema fueron respectivamente:

$$27630 [s]$$

$$487 \$$$

Se añade también, para este día, la obtención de la temperatura inicial del horario de oficina, la cual alcanza el valor de:

$$26,46\text{ }^{\circ}C$$

Cabe destacar que en gráfico de temperatura del análisis particular de un día, se añaden dos curvas de color rojo, que representan los instantes de inicio y término del horario de oficina.

## 6.2. CASO 2 - Predicción pre horario laboral

Para el análisis de los resultados de la predicción de temperatura pre horario laboral, se presenta el porcentaje de confort térmico y los costos de operación del día 13/02/2018 al implementar esta mejora. Además, se evalúa la temperatura inicial del horario laboral al utilizar una *App Meteorológica* y una *Base de Datos*, con el fin de comprobar y comparar la efectividad de predicción de cada base predictiva.

En cuanto a las dinámicas del sistema:

- Flujo de Potencia.
- Comportamiento de temperaturas y uso de sistema HVAC.
- Estado de carga del ESS

Sus comportamientos son incluidos en el apartado D del Apéndice.

### 6.2.1. Día 13/02/2018 usando datos de App Meteorológica

El porcentaje de confort obtenido, alcanza el valor de:

$$99,33\%$$

Mientras que el tiempo efectivo de operación del sistema HVAC y los costos totales asociados al sistema fueron respectivamente:

$$27720\text{ [s]}$$

$$490\text{ \$}$$

En cuanto a la efectividad del método, la temperatura inicial del horario de oficina fue de:

$$25,09\text{ }^{\circ}C$$

### 6.2.2. Día 13/02/2018 usando datos de Base de Datos

El porcentaje de confort obtenido, alcanza el valor de:

$$99,42 \%$$

Mientras que el tiempo efectivo de operación del sistema HVAC y los costos totales asociados al sistema fueron respectivamente:

$$27720 [s]$$

$$491 \$$$

En cuanto a la efectividad del método, la temperatura inicial del horario de oficina fue de:

$$25,96 ^\circ C$$

### 6.2.3. Evaluación de la mejora

De los resultados obtenidos, primero se debe rescatar el hecho de que se produjo un aumento en el porcentaje de confort térmico alcanzado durante el día. Para el uso de datos de una app meteorológica, el porcentaje de confort alcanzado fue de 99,33 %, mientras que para la base de datos, el valor alcanzado fue de 99,42 %. Este hecho ocurre producto de la dinámica de operación que sostiene el sistema HVAC, dado a que el paso temporal de operación es cada 90[s], se producen instantes de tiempo intermedio en la habitación en donde la temperatura sobresale levemente del rango de confort, hasta que vuelve a darse la orden de operación y se reintegra en el rango de temperatura de confort.

La falencia del EMS de no lograr alcanzar exactamente el 100 % de confort térmico durante el horario de oficina, puede ser fácilmente corregida disminuyendo levemente el rango de confort exigido por el control homeostático, impidiendo así que los 90[s] sin operación sean suficientes para que salga del rango al estar inoperativo. También, Otro método para corregir esta falencia, es acortar el paso temporal de operación del sistema HVAC, en modo de que el tiempo de reacción del EMS sea mínimo e impida los periodos de temperatura fuera del rango de confort.

Otro análisis de interes que sobre sale de los resultados presentados, es la diferencia en costos producida entre el método con base de datos y el con app meteorológica. Pese a que el tiempo de operación del sistema HVAC es el mismo, se produce una diferencia de 1 \$ en la operación del día, entre un método predictivo y otro, lo cual es producto de la operación resultante para el sistema HVAC que genera el EMS. En el caso de uso de una base de datos, la operación global del sistema HVAC tiene un mayor tiempo efectivo en el bloque tarifario *punta*, a diferencia del uso de la app meteorológica que concentra más su operación en el bloque tarifario *día*.

Finalmente, al observar las temperaturas iniciales del horario de oficina, se determina que sólo la app meteorológica consigue efectivamente alcanzar una temperatura dentro del rango de confort al inicio del horario laboral, demostrando la falencia que tiene el uso de base de datos al utilizarse para análisis predictivos. Desde un punto de vista cuantitativo,

el sistema HVAC en el caso de la app meteorológica, comenzó a operar exactamente 90[s] antes que para la base de datos, lo cual corresponde a un solo paso temporal antes (tiempo suficiente para marcar la diferencia de temperatura).

### 6.3. CASO 3 - Predicción pre aumento tarifario

Para la predicción térmica pre aumento tarifario, se evalúan dos escenarios diferentes. La decisión de contienda de temperatura que se tomó en cada escenario fue motivada por los resultados de experimentación, dado a que existen y se reconocen limitantes importantes al momento de querer almacenar energía térmica en un sistema como el modelado en la nano red.

Se presentará para análisis la dinámica:

- Comportamiento de temperaturas y uso de sistema HVAC

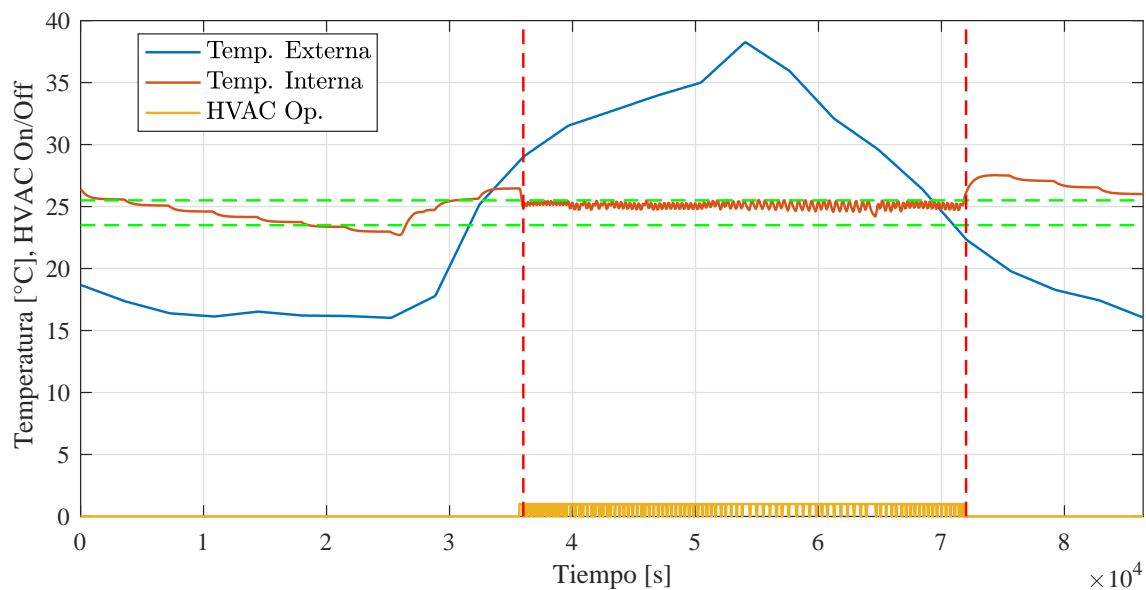
Junto con los costos asociados a la operación del sistema y el cumplimiento de la contienda de temperatura al instante de iniciar el bloque tarifario *punta*.

Cabe destacar que las simulaciones realizadas en este punto, consideran también las mejoras instauradas en el caso de predicción térmica pre horario laboral.

Se añade al apartado D del Apéndice las demás dinámicas que se desprenden las simulaciones de este caso.

#### 6.3.1. Contienda de temperatura $24,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ al inicio del bloque tarifario punta

La dinámica de temperaturas obtenida para una contienda de  $24,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , se presenta a continuación en la Figura 6.11.



**Figura 6.11:** Comportamiento de temperaturas y uso de sistema HVAC 13/02/2018 CASO 3 exigiendo temperatura de  $24,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

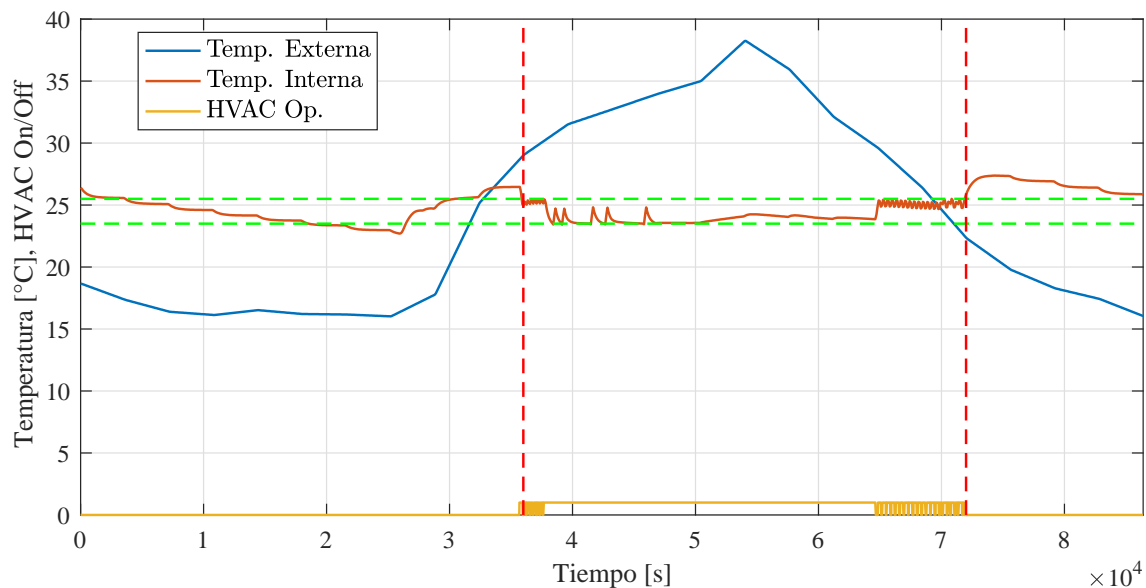
Por otra parte, la evaluación de costos y la temperatura alcanzada por la nano red al instante de iniciar el bloque tarifario *punta*, son las siguientes:

493 \$

24,5 °C

### 6.3.2. Contienda de temperatura 24,2 °C al inicio del bloque tarifario punta

La dinámica de temperaturas obtenida para una contienda de 24,2 °C, se presenta a continuación en la Figura 6.12.



**Figura 6.12:** Comportamiento de temperaturas y uso de sistema HVAC 13/02/2018 CA-SO 3 exigiendo temperatura de 24,2 °C.

Por otra parte, la evaluación de costos y la temperatura alcanzada por la nano red al instante de iniciar el bloque tarifario *punta*, son los siguientes:

668 \$

24,2 °C

### 6.3.3. Comparación entre escenarios y evaluación de la mejora

Primero que todo, se debe visualizar que ambos resultados lograron su contienda, demostrando que el programa pudo iterar las veces necesarias para lograr el resultado exigido, sin salir del confort térmico en el horario de oficina.

Del caso con contienda de 24,5 °C, se observa que sin aumentar mucho el uso del sistema HVAC, consigue alcanzar la temperatura deseada, sin embargo, los costos de operación aumentaron en 3 \$ con respecto al caso anterior. Este hecho indica que utilizar almacenamiento térmico en un sistema como el estudiado para la nano red en evaluación,

no necesariamente produce ahorros monetarios ni energéticos, más bien, se necesita aumentar el tiempo de uso del sistema HVAC, sin verse retribuido posteriormente con una disminución de uso en el bloque tarifario *punta*.

Luego, si se analiza el caso de contienda de  $24,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , los resultados tienden a ser mucho peores. El motivo de este empeoramiento es debido a que para lograr dicha temperatura, no basta con encender el sistema HVAC a toda su potencia minutos antes de llegar al momento clave. Debido al flujo de calor que se produce en la habitación de estudio, el sistema HVAC no consigue disminuir rápidamente la temperatura al interior del lugar, producto de la alta diferencia de temperatura que existe dentro y fuera del recinto. Además, si se considera que el instante de paso al bloque tarifario *punta*, es cercano al momento en que se alcanza la mayor temperatura al interior de la habitación (ver Figura 6.7 para referencia), se está analizando el instante más crítico en temperatura del comportamiento de la nano red.

## 6.4. CASO 4 - Uso de ESS para disminución de costos

El uso del ESS marcará una diferencia importante en los costos de operación de la nano red. La idea es crear una rutina de uso y carga de energía que permita mantener un ciclo de uso en las baterías.

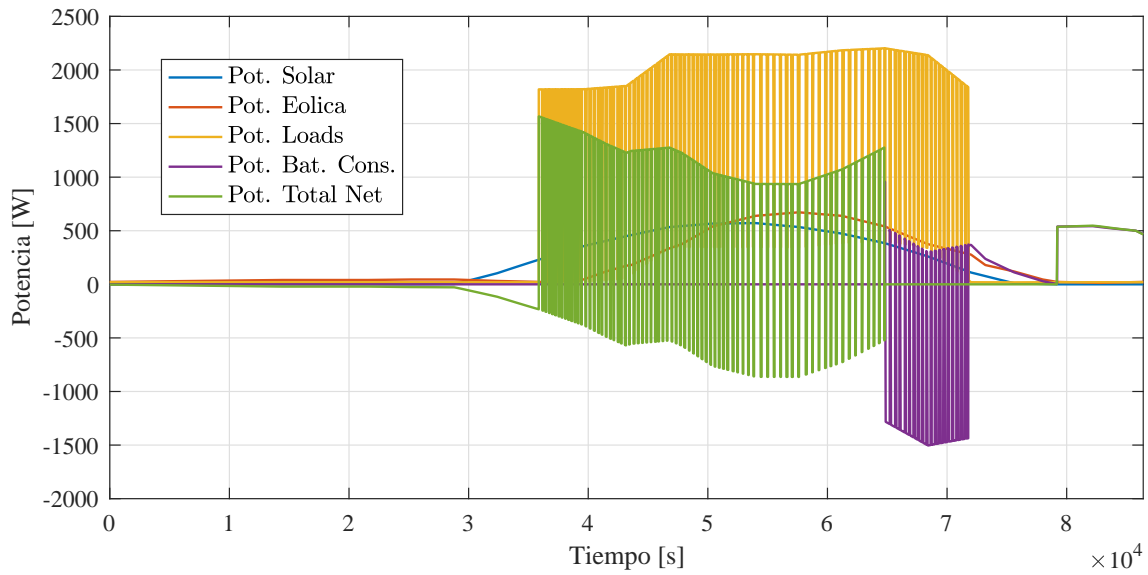
Para la evaluación del uso del ESS se simula el día 13/02/2018 y las semanas de verano e invierno sin considerar otras mejoras (aplicado directamente sobre el caso 1). El análisis se desarrollará a partir de las dinámicas:

- Flujo de Potencia.
- Comportamiento de temperaturas y uso de sistema HVAC.
- Estado de carga del ESS

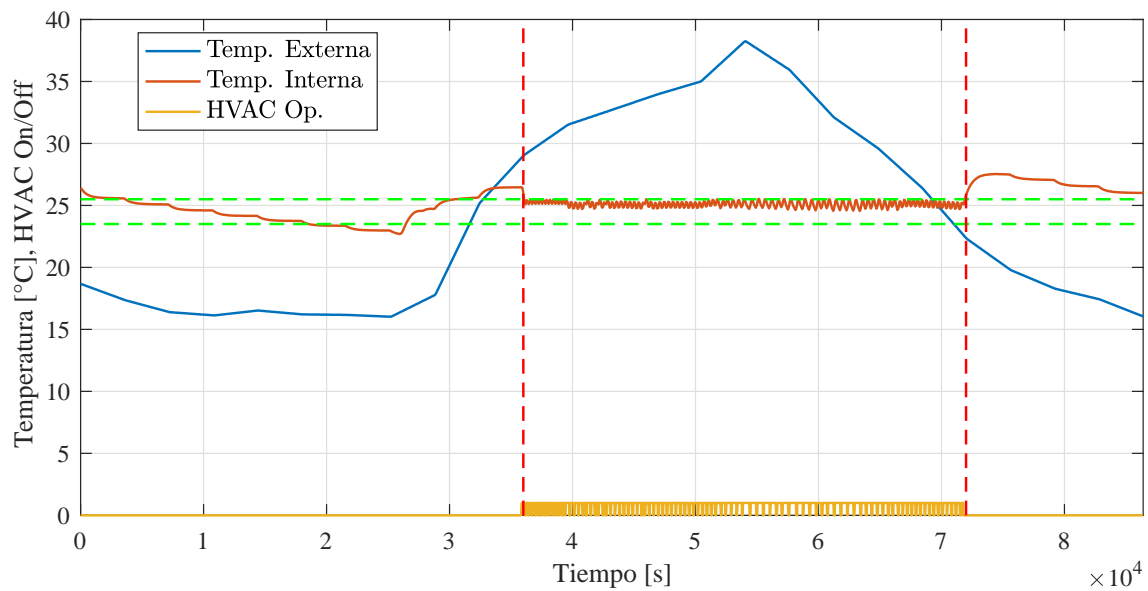
Para luego incluir un análisis de costos de operación de la nano red.

### 6.4.1. Día 13/02/2018 usando ESS para disminución de costos

Para la simulación del día 13/02/2018, las dinámicas se presentan en las Figuras 6.13, 6.14 y 6.15 a continuación:

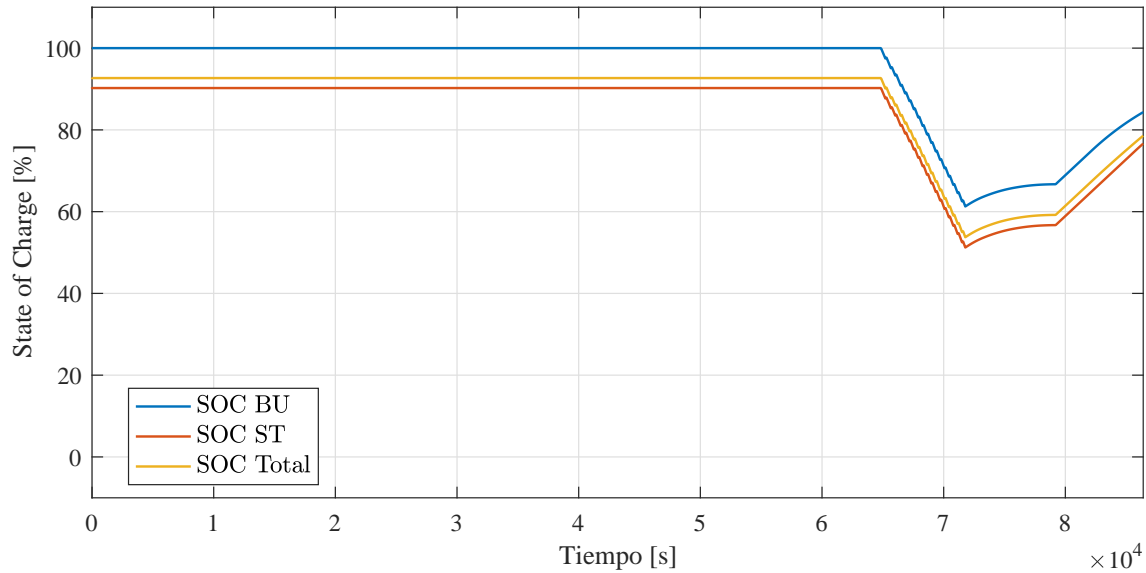


**Figura 6.13:** Flujo de potencia 13/02/2018 CASO 4.



**Figura 6.14:** Comportamiento de temperaturas y uso de sistema HVAC 13/02/2018 CASO 4.





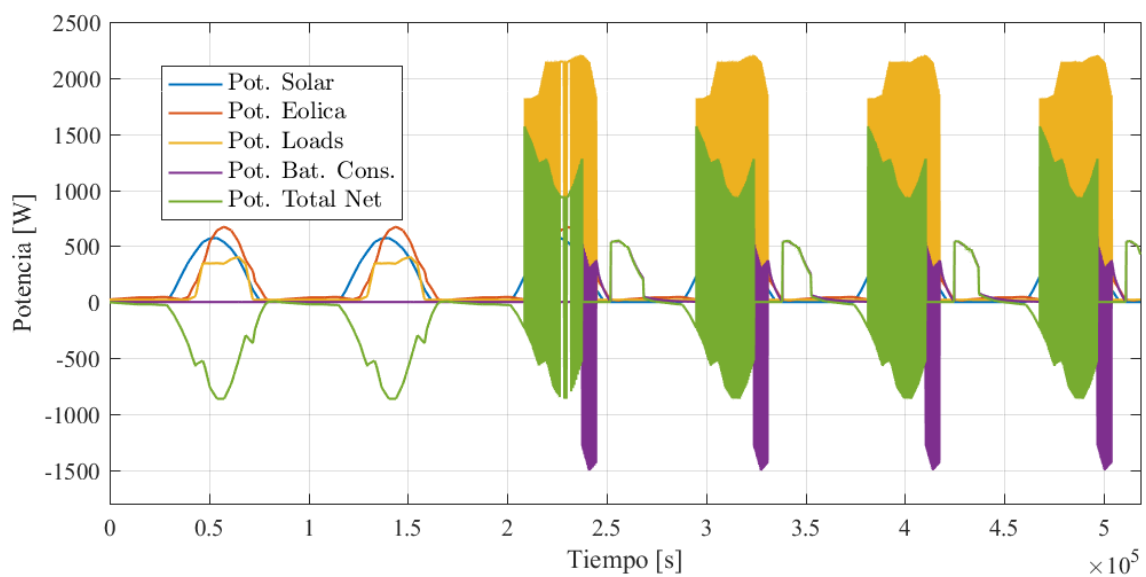
**Figura 6.15:** Estado de carga del ESS 13/02/2018 CASO 4.

Por otra parte, los costos de operación son:

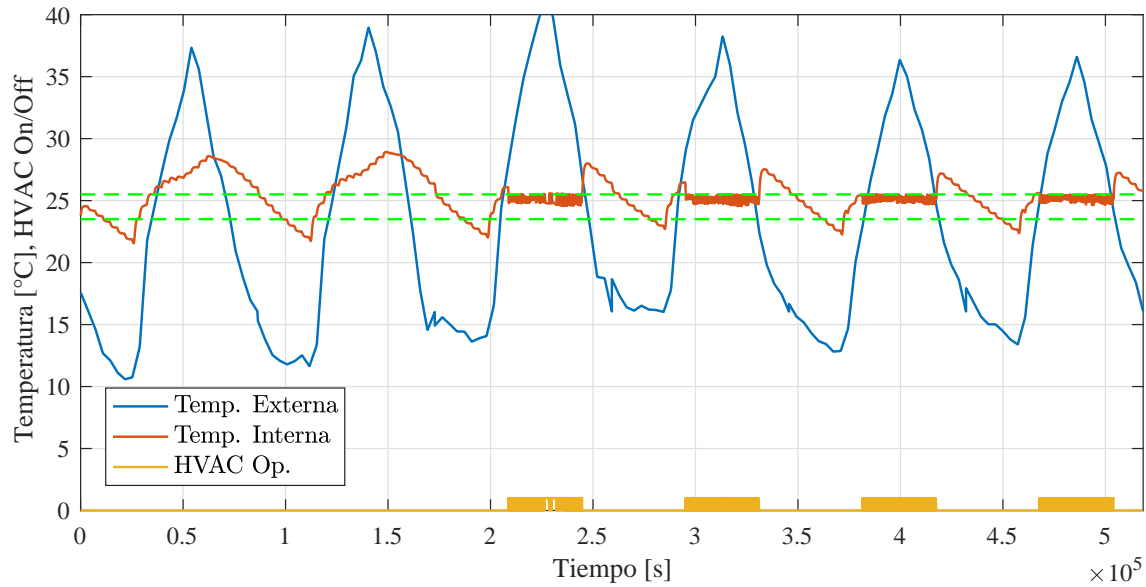
402 \$

#### 6.4.2. Semana Verano usando ESS para disminución de costos

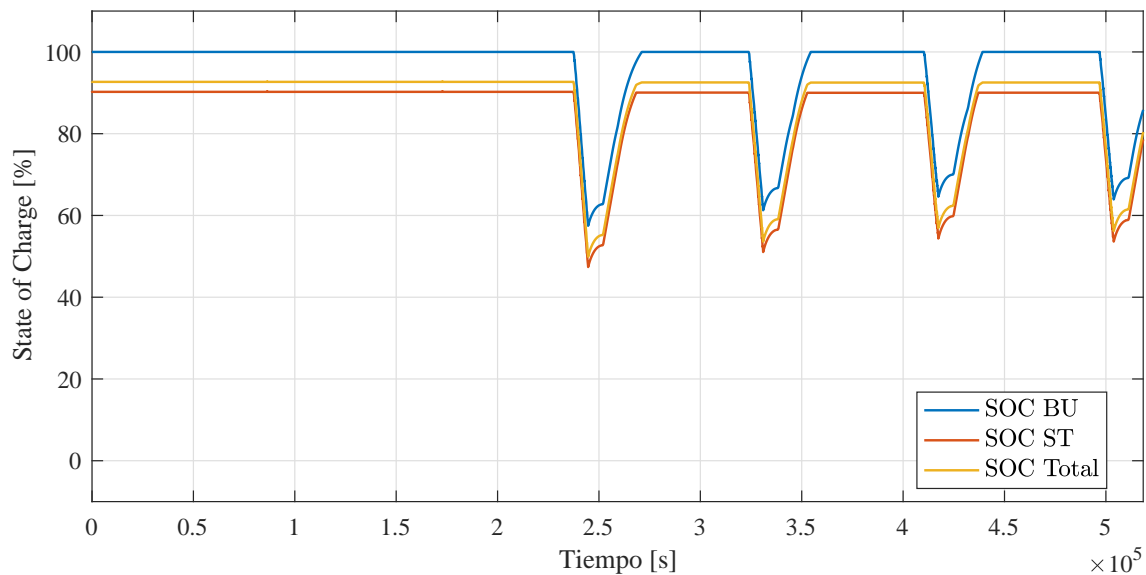
Para la simulación de la semana de verano, las dinámicas se presentan en las Figuras 6.16, 6.17 y 6.18, y se presentan como sigue:



**Figura 6.16:** Flujo de potencia semana de verano CASO 4.



**Figura 6.17:** Comportamiento de temperaturas y uso de sistema HVAC semana de verano CASO 4.



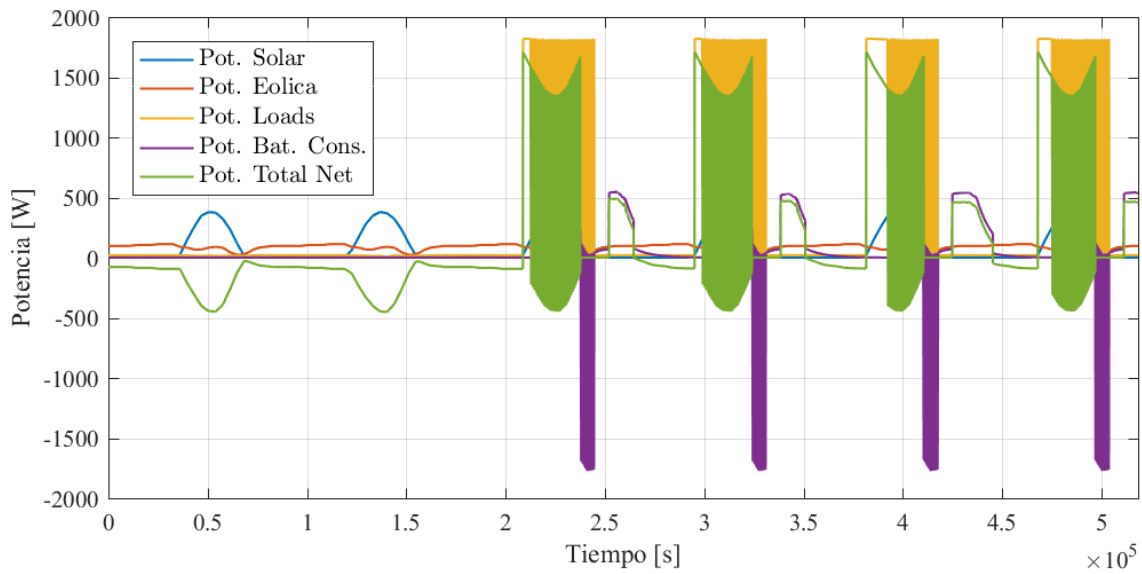
**Figura 6.18:** Estado de carga del ESS semana de verano CASO 4.

Por otra parte, los costos de operación son:

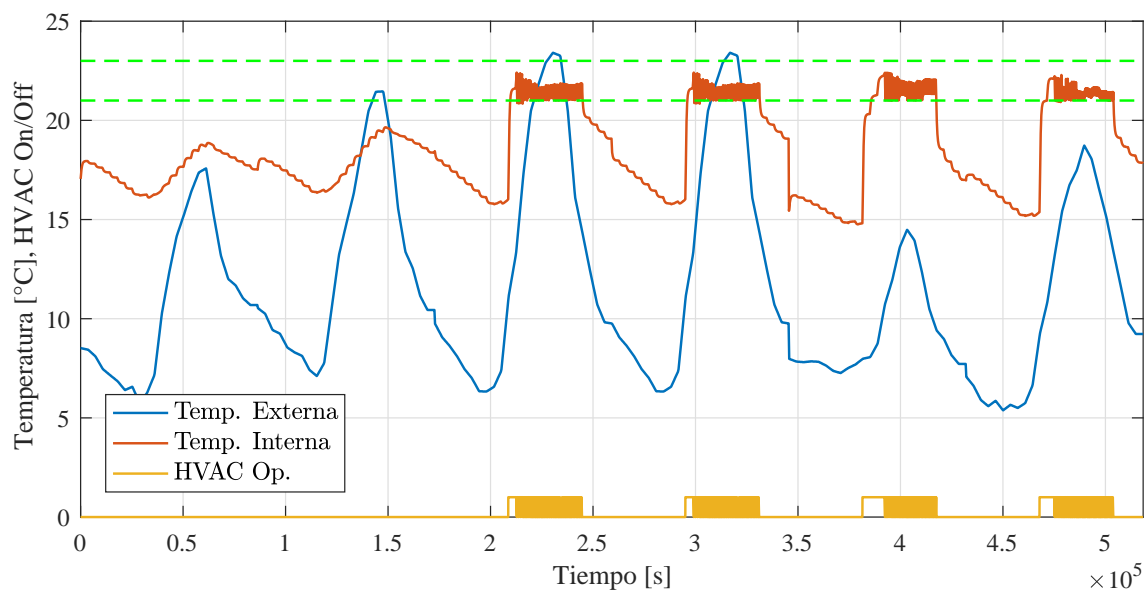
520 \$

### 6.4.3. Semana Invierno usando ESS para disminución de costos

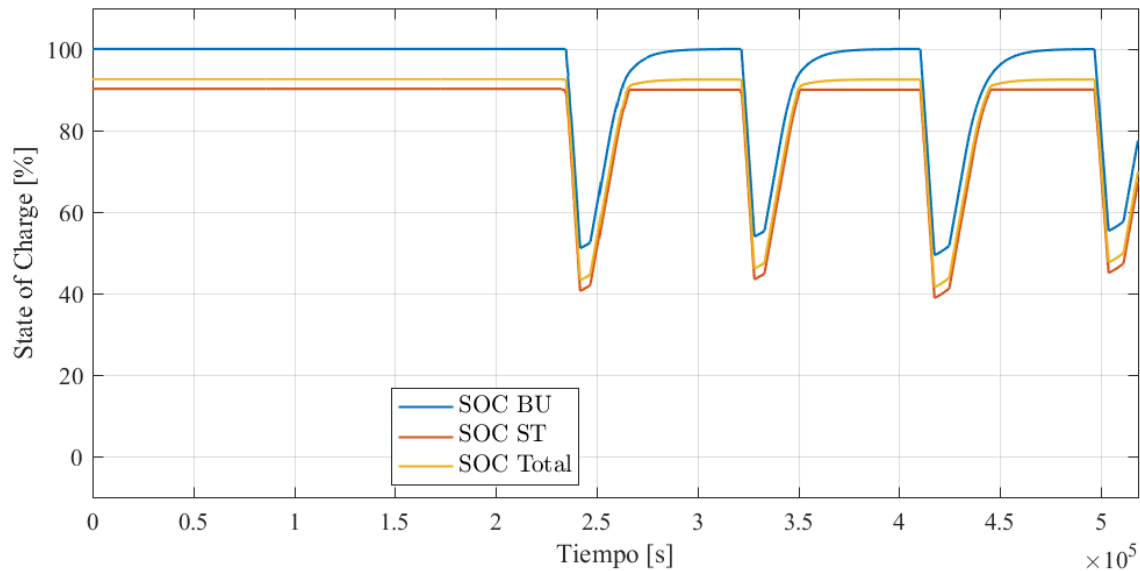
Por último, las dinámicas de la semana de invierno se pueden observar en las Figuras 6.19, 6.20 y 6.21 mostradas a continuación:



**Figura 6.19:** Flujo de potencia semana de invierno CASO 4.



**Figura 6.20:** Comportamiento de temperaturas y uso de sistema HVAC semana de invierno CASO 4.



**Figura 6.21:** Estado de carga del ESS semana de invierno CASO 4.

Luego, los costos de operación son:

1522 \$

#### 6.4.4. Evaluación de la mejora

En primera parte, se puede observar que en los dos escenarios (día y semana de verano), se logró una mejora en costos con respecto al caso base correspondiente. En el caso particular del día 13/02/2018, el costo de operación fue de 204 \$, mientras que para las semanas de verano e invierno el costo de operación fue de 520 \$ y 892 \$ respectivamente.

El porcentaje de SOC alcanzado en cada caso no bajo del 42,58 % (peor caso), por lo que, pese a la operación, se mantiene al final del ciclo energía suficiente para resguardar la seguridad del sistema de la nano red ante un corte de energía.

A grandes rasgos, esta es una mejora completamente efectiva, que debe ser optimizada por una lógica que mejore la vida útil de las baterías, definiendo cuales son los límites de carga y descarga, así como de uso instantáneo de la batería (máxima corriente de operación). Para fines de esta investigación, tal y como se presentó anteriormente en el diagrama de control por homeostasis (Figura 4.29), los límites de carga y descarga para el conjunto Storage de las baterías es 90 % y 20 %, mientras que el de la batería Back Up, es directamente 100 % y 0 %, dado a que en ningún momento es desconectado de la nano red.

### 6.5. CASO 5 - Contingencias en la red de distribución

La existencia de contingencias y perturbaciones en la red siempre serán un fenómeno indeseado para todo sistema eléctrico. En este caso se busca simular un corte de suministro eléctrico con una duración de 4 horas. La idea es analizar el desempeño de la gestión de energía producida por el EMS y su algoritmo de control homeostático, determinando

también cuales serán los límites de operación de la nano red (en caso de que la falla persista en el tiempo), con el fin de resguardar la seguridad e integridad de todo el sistema.

Para analizar este caso, se evalúa en día base 13/02/2018 aplicando un corte de energía durante las 10 : 00 *hrs* y las 16 : 00 *hrs* de la tarde, para luego reestablecer el sistema y que la nano red busque mantener la temperatura de confort por el mayor tiempo posible.

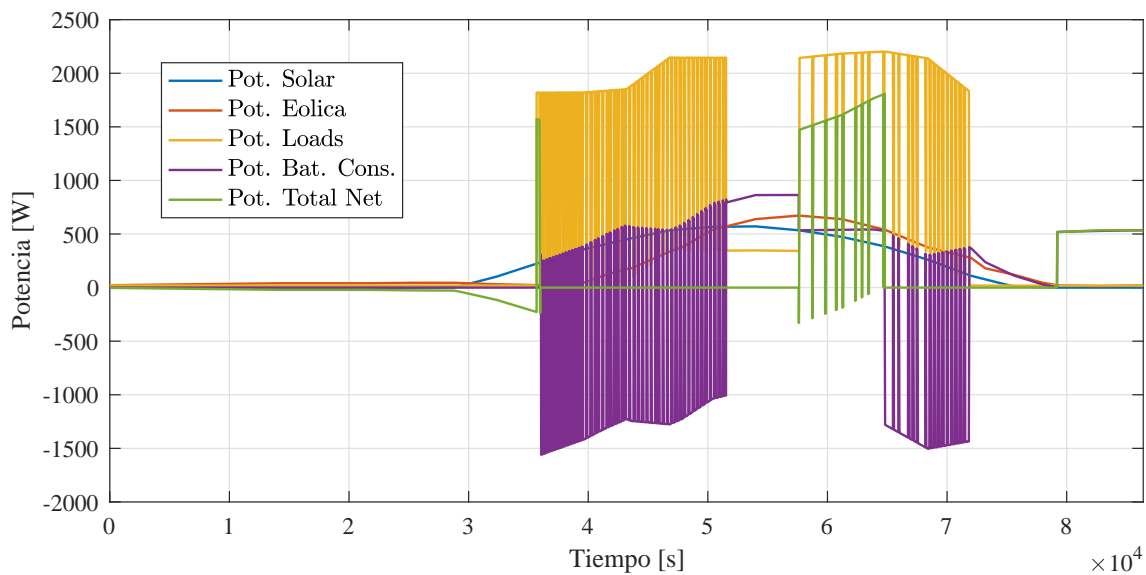
Se analizarán las tres dinámicas:

- Flujo de Potencia.
- Comportamiento de temperaturas y uso de sistema HVAC.
- Estado de carga del ESS

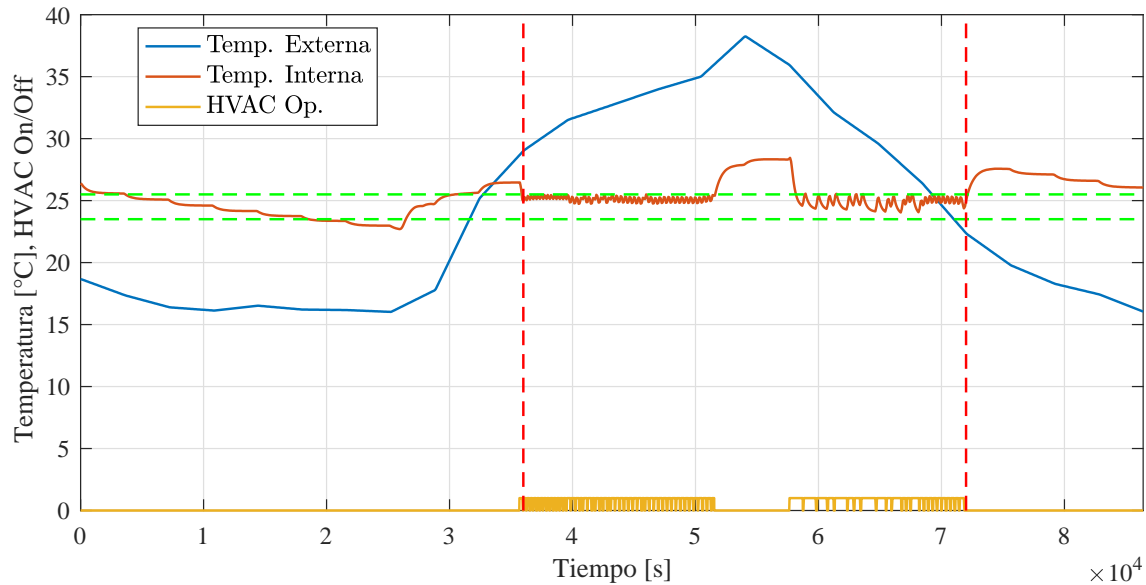
Dando énfasis en el porcentaje de confort térmico alcanzado durante el día.

### 6.5.1. Día 13/02/2018 con contingencias en red de distribución

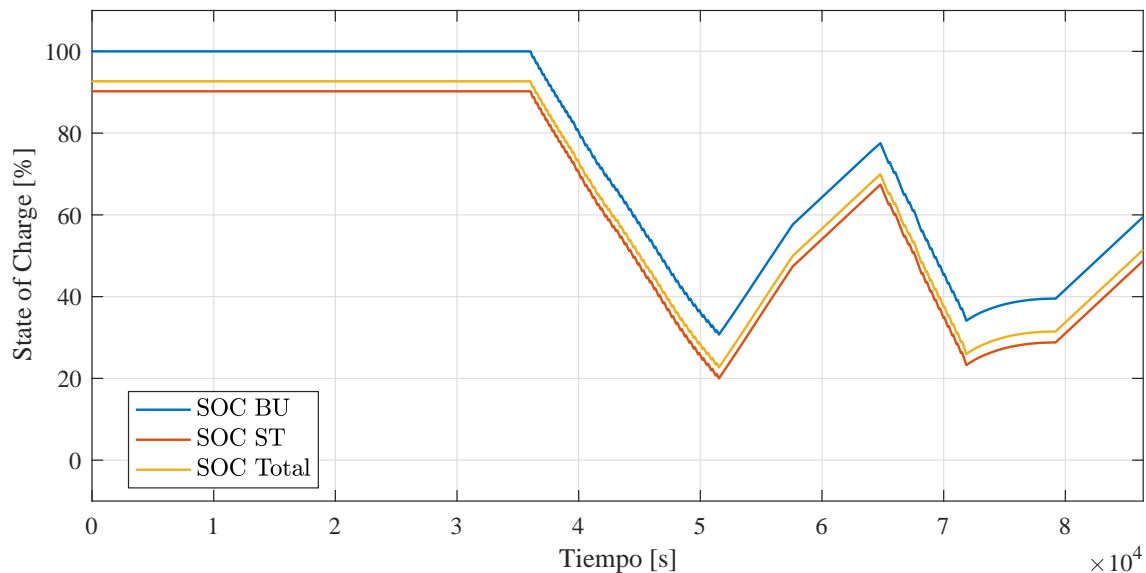
Las dinámicas obtenidas para el día de estudio se presentan en las Figuras 6.22, 6.23 y 6.24 a continuación:



**Figura 6.22:** Flujo de potencia 13/02/2018 CASO 5.



**Figura 6.23:** Comportamiento de temperaturas y uso de sistema HVAC 13/02/2018 CA-SO 5.



**Figura 6.24:** Estado de carga del ESS 13/02/2018 CASO 5.

Por otra parte, el porcentaje de confort obtenido alcanza el valor de:

$$80,92 \%$$

### 6.5.2. Evaluación de la operación del algoritmo de control

Primero que todo, y a modo general, el porcentaje de confort térmico obtenido durante el día es un 17,99 % más bajo que el del caso base. Se observa que el sistema HVAC estuvo apagado durante un periodo de 6120 [s], equivalente a 1 : 42 hrs. por motivo de ausencia

de energía. Del mismo modo, es posible concluir que el tiempo off grid que logra mantener el ESS, es de 2 : 18 *hrs* en un periodo de consumo intensivo.

Al ocurrir la contingencia, el sistema pasó a modo off grid operando solamente con energía proveniente del ESS que fue almacenada previamente. Debido a que existe una restricción en las baterías del conjunto storage sobre el mínimo estado de carga que debe mantener, al alcanzar el 20 % de carga, el sistema HVAC es automáticamente apagado. Producto de esto, la energía generada por el sistema DER, es mayor al consumo restante, por lo que comienza un proceso de carga de las baterías que dura hasta el instante de restablecimiento del servicio de distribución.

Posterior a esto, a las 18 : 00 *hrs*, se comienza con el procedimiento de ahorro de energía utilizando la energía almacenada en el ESS. Durante este procedimiento, las baterías logran mantenerse sobre el 20 % de carga, por lo que en ningún momento se requiere reconexión a la red ni desconexión de las baterías.

De este caso cabe analizar qué ocurriría ante una falla que dure por un tiempo mucho más prolongado. Dado a que el sistema DER comenzó a cargar el ESS, debería llegar un instante de re operación del sistema HVAC, sin embargo si el ciclo de descarga vuelve a ocurrir, es esperable que luego de un número de ciclos se decida detener el proceso hasta reestablecer conexión con la red de distribución.

Para fines de este estudio, se definió en la lógica de control un límite de dos ciclos de operación (definido en forma arbitraria) tras ocurrir una falla en la red de distribución. Este límite puede ser fácilmente modificado y ajustado de acuerdo a las solicitudes que tenga el propietario u ocupante de la habitación de estudio.

## 6.6. Cuadro Resumen

En las Tablas 6.1 y 6.2 a continuación, se presenta el resumen de los resultados presentados en este capítulo y empleados en análisis de los diferentes casos de estudio.

	CASO 1			CASO 2		CASO 3	
Parámetro	Verano	Invierno	Día	Día App	Día BD	Cont. 24,5 [°C]	Cont. 24,5 [°C]
Confort térmico %	98,91	92,44	98,91	99,33	99,42	-	-
Tiempo de operación [s]	102870	97020	27630	27720	27720	-	-
Costos \$	606	2615	487	490	491	493	668
Temp. inicial [°C]	-	-	26,46	25,09	25,96	-	-
Temp. ini. punta [°C]	-	-	-	-	-	24,5	24,2

**Tabla 6.1:** Resumen de resultados para los CASOS 1, 2 y 3.

	CASO 4			CASO 5
Parámetro	Día	Verano	Invierno	Día
Confort térmico %	-	-	-	80,92
Tiempo de operación [s]	-	-	-	-
Costos \$	402	520	1522	-
Temp. inicial [ $^{\circ}C$ ]	-	-	-	-
Temp. ini. punta [ $^{\circ}C$ ]	-	-	-	-

**Tabla 6.2:** Resumen de resultados para los CASOS 4 y 5.

## 6.7. Casos Extra

Adicional a los cinco casos propuestos y evaluados en este capítulo, como respuesta a los resultados y análisis se presentan dos casos de estudio adicionales de análisis, a través de los cuales será posible profundizar puntos de interés y evaluar más profundamente las capacidades del EMS y su lógica de control.

### 6.7.1. Rango límite para asegurar confort térmico

A partir del caso de predicción térmica pre horario laboral, se desprende la idea de que al disminuir el rango de confort exigido en simulación, se consiga obtener el 100 % de confort térmico durante el horario de oficina.

Para corroborar dicha hipótesis, se simula el día 13/02/2018 con la mejora implementada en el caso de predicción térmica pre horario laboral, exigiendo un rango de confort entre los 25,2  $^{\circ}C$  y los 23,8  $^{\circ}C$ , para luego verificar si se consigue obtener el confort deseado.

De la simulación, los resultados de porcentaje de confort, tiempo de uso del sistema HVAC y costos de operación, se presentan en el orden respectivo:

100 %

29250 [s]

539 \$

Es posible notar que ya considerando una disminución de 0,6  $^{\circ}C$  en la histéresis del rango de confort, es posible mantener confort térmico durante todo el horario de oficina. De este modo, se cumple la hipótesis estipulada anteriormente.

Una forma de obtener el valor real en que se debe disminuir la histéresis es evaluando los resultados, de forma que se obtenga cual es la mayor diferencia operacional de temperatura obtenida entre el rango de confort y el comportamiento real. Pese a servir como solución parcial, cada día es diferente, por lo que podría desarrollarse un nuevo tópico de aprendizaje en donde se vaya optimizando cuanto se debe disminuir el rango de histéresis según la época y operación del sistema HVAC.



### 6.7.2. Almacenamiento térmico

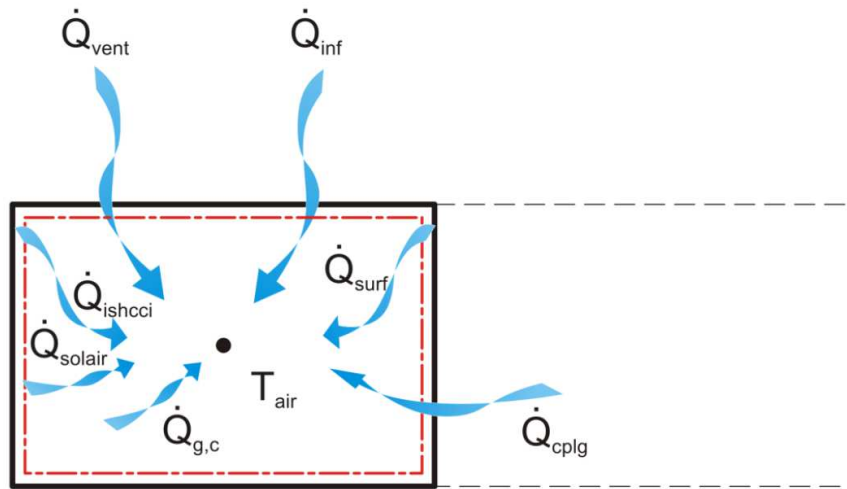
Uno de los fenómenos presentados y estudiados en el apartado 4.7, son el Factor de Decremento  $f$  y el Tiempo de Retraso  $\Phi$ . A partir del gráfico de la Figura 6.7, es posible obtener ambos factores, dando como resultado lo siguiente:

$$f = \frac{29,51 - 22,69}{38,24 - 16,02} \cdot 100 = 30,7\%$$

$$\Phi = 64890 - 54090 = 10800[s] = 3[hrs]$$

A partir de esto se puede evidenciar la existencia de una inercia térmica al interior de la habitación de estudio. Para comprender mejor cómo se comporta la ecuación que rige el almacenamiento térmico, primero, es necesario comprender el entorno TRNSYS y la simulación que se desarrolló para la nano red en estudio.

TRNSYS define el espacio físico de estudio (la habitación o zona térmica) como un nodo térmico, el cual es regido por una serie de flujos de calor producto de diferentes condiciones físicas y eventualidades que ocurren en la habitación, como la radiación solar o la diferencia de temperatura con habitaciones aledañas a la de estudio. El esquema gráfico de este hecho se presenta a continuación en la Figura 6.25.



**Figura 6.25:** Flujos de calor de convección, conducción y radiación, en una zona  $i$

La ecuación que rige el flujo de calor al nodo de aire es:

$$\dot{Q}_i = \dot{Q}_{surf,i} + \dot{Q}_{inf,i} + \dot{Q}_{vent,i} + \dot{Q}_{g,c,i} + \dot{Q}_{cplg,i} + \dot{Q}_{solair,i} + \dot{Q}_{ISHCCI,i} \quad (6.1)$$

Donde:

$\dot{Q}_{surf,i}$  es la ganancia convectiva de las superficies.

$\dot{Q}_{inf,i}$  es la ganancia de infiltración (flujo de aire sólo desde el exterior).

$\dot{Q}_{vent,i}$  es la ganancia de ventilación (flujo de aire de una fuente definida por el usuario), como la de un sistema HVAC.

$\dot{Q}_{g,c,i}$  son las ganancias convectivas internas (por personas, equipos, iluminación, radiadores, etc.).

$\dot{Q}_{cplg,i}$  son las ganancias debidas al flujo de aire (convectivo) del nodo de aire  $l$  o por condición límite.

$\dot{Q}_{solair,i}$  la fracción de radiación solar que entra al nodo a través de ventanas externas y que se transfiere inmediatamente como ganancia convectiva al aire interior.

$\dot{Q}_{ISHCCI,i}$  es la radiación solar absorbida en todos los dispositivos de protección solar internos de la zona y transferida directamente como ganancia convectiva al aire interior.

Los flujos de calor de convección, conducción y radiación en una zona  $i$  son en general aportados por la diferencia de temperatura con una zona  $j$  adyacente (habitaciones aledañas, cuerpos que liberen o absorban calor, sistemas HVAC, etc.), dividida por una resistencia térmica que da lugar a la inercia del sistema  $R_{i,j}$  ( $C^\circ/W$ ), más una perturbación aditiva independiente  $b_i$  ( $W$ ) como la radiación solar [40]. Ambas variables son afectadas por la capacidad térmica de la zona  $C_i$  ( $J/C^\circ$ ), de manera que  $\dot{T}_i$ , afectado por su conexión con otras zonas  $j$  y la perturbación  $b_i$ , puede ser descrita como:

$$\dot{T}_i = \sum_j ((T_j - T_i) / (R_{i,j} C_i)) + b_i / C_i \quad (6.2)$$

A partir de la ecuación 6.2, es posible analizar como variable independiente el flujo de calor por convección del sistema HVAC, el cual es ajustado a una temperatura  $T_g$  para controlar el estado térmico de la zona. De esta manera, la ecuación puede ser descrita de la siguiente forma:

$$\dot{T}_i = \sum_j ((T_j - T_i) / (R_{i,j} C_i)) + b_i / C_i + ((T_g - T_i) / (R_{i,g} C_i)) \quad (6.3)$$

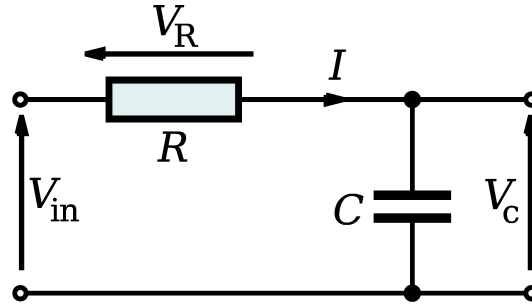
En el caso particular de este trabajo de investigación, el almacenamiento térmico alcanzado por la zona de estudio tiene una variabilidad muy rápida ante el uso del sistema HVAC. lo que denota una baja resistencia térmica ante su actuación. Desde una perspectiva de tiempo reducido, en el mismo intervalo de tiempo en el cual la variación de la energía térmica almacenada (es decir, de la temperatura al interior de la habitación) es significativamente mayor a la variación de la temperatura de las zonas adyacentes, motivo por el cual es posible aproximar este último término a un valor constante y generalizado. Análogamente, se realiza esta aproximación con la perturbación producida por los efectos de radiación.

Considerando ambas aproximaciones, una forma de representar la ecuación 6.3, acorde con el trabajo de investigación y el almacenamiento térmico en estudio, se define como sigue:

$$\dot{T} = A \cdot T + B \cdot u + C \quad (6.4)$$

Donde  $T$  corresponde a la temperatura dentro de la habitación,  $u$  es la temperatura controlada del sistema HVAC y los coeficientes  $A$ ,  $B$  y  $C$  son los que reproducen la dinámica térmica de la habitación.

La expresión obtenida es similar a la de un circuito RC en serie, con una tensión DC constante  $V_{in}$  ajustada por la ganancia  $u$  del sistema HVAC (Figura 6.26). Considerando el comportamiento de la curva de la Figura 4.26, presentada en el apartado 4.7 al diseñar el sistema HVAC, donde, previo a encender el sistema HVAC se mantenía una temperatura de  $15,93^{\circ}\text{C}$  y posterior a encenderlo se aumentó la temperatura hasta los  $20,91^{\circ}\text{C}$ , se obtiene un  $\tau = 497,7$  [s].



**Figura 6.26:** Circuito RC en serie.

Posteriormente, asumiendo que  $u(t)$  corresponde a la temperatura de control a la que se ajusta el sistema HVAC (temperatura objetivo) para controlar la temperatura al interior de la habitación, al encontrarse apagado por un periodo de tiempo  $> 5\tau$  el sistema HVAC, la temperatura  $u(t)$  es idéntica a la de la zona  $i$ . Además, debido a que la ganancia del sistema HVAC afecta rápidamente la dinámica de la habitación, la resistencia térmica  $R_{i,g}$  es mucho más pequeña que el resto de las resistencias, por lo que su efecto al encontrarse apagado es despreciable sobre la temperatura de la zona. Considerando lo planteado previamente y la similitud que existe con el comportamiento de carga de un circuito RC, los coeficientes  $A$ ,  $B$  y  $C$  se pueden describir de la siguiente manera:

$$\dot{T} = A \cdot T + B \cdot u + C \rightarrow T(t) = K_1 \cdot e^{A \cdot t} + K_2$$

$$A = -1/\tau = -0,002$$

$$t = 0 \Rightarrow T(0) = 15,93 = C$$

$$t = \infty \Rightarrow T(\infty) = 20,91 = B \cdot 20,91 + C \Rightarrow B = 0,2382$$

Por lo tanto, la ecuación dinámica que describe el comportamiento de temperatura para la situación evaluada, corresponde a:

$$\dot{T} = -0,002 \cdot T + 0,2382 \cdot u + 15,93 \quad (6.5)$$

Pese a que esta ecuación diferencial da una mirada general a la ecuación que describe el proceso de carga térmica de la zona de estudio, la variable  $u$  debe ser definida correctamente, ya que de la ecuación 6.3, la temperatura  $T_g$  no es idéntica a la temperatura objetivo, si no que corresponde a la temperatura que debe mantener el sistema HVAC para que la temperatura  $T_i$  alcance la temperatura deseada. Del mismo modo, el coeficiente  $C$  puede variar constantemente, al existir variaciones significativas de la temperatura externa de la habitación, o bien de los efectos de radiación considerados anteriormente constantes.

# Capítulo 7

## Conclusiones y Comentarios Finales

### 7.1. Conclusiones

- De los análisis realizados, en primera instancia se mostró la efectividad del EMS para sostener la temperatura de confort al interior de la habitación en estudio durante el horario de oficina (entre las 10 : 00 *hrs* y las 20 : 00 *hrs*) de un día hábil, alcanzando un porcentaje de confort del 98,91 % en el caso base (es decir, manteniendo un uso intermitente del aire acondicionado según sea la condición térmica actual del sistema).
- Luego, al considerar seis días de operación, en verano e invierno se observaron diferentes dificultades térmicas para lograr el objetivo de mantener la temperatura de confort, dado a que al aumentar la temperatura externa con relación a la temperatura interna del confort térmico, se requiere una mayor operación del sistema HVAC y además, se obtiene un menor porcentaje de confort en la operación semanal del EMS.
- Del análisis semanal más similar a la actualidad en la nano red, se obtuvieron porcentajes de confort de 98,91 % para verano, y 92,44 % para invierno, lo que demostró que mientras mayor sea diferencia entre la temperatura inicial del sistema en estudio y la temperatura de confort deseada, se requiere un mayor tiempo de neutralización.
- Para poder alcanzar el 100 % de confort durante el horario de oficina, es necesario disminuir el rango de exigencia térmica ingresado al sistema, o bien, disminuir el paso temporal en que se decide si opera o no el sistema HVAC, con el fin de que la homeostasis reactiva sea más rápida en efectuar una operación del sistema HVAC. Se demostró como caso anexo que al disminuir el rango de confort en 0,6 °C para la operación del sistema HVAC, ya es posible obtener un porcentaje de confort efectivo del 100 % en la operación de un día hábil que considere la mejora del caso de predicción térmica pre horario laboral.
- La mejora instaurada en el caso de predicción térmica pre horario laboral, consiste en lograr una temperatura de confort al instante en que se inicia el horario de oficina. En general esta temperatura tiende a estar alejada del rango de confort, obligando a las personas a soportar las diferentes temperaturas, hasta que el sistema HVAC logra neutralizar la situación térmica interna. Esta mejora fue analizada obteniendo un

porcentaje de confort de al menos 99,33 % (caso más bajo) para el día de simulación del 13/02/2018 en verano.

- También fue posible durante el análisis de esta primera mejora, comparar el uso de un sistema predictivo en base a una app meteorológica 100 % efectiva en su predicción, versus una base de datos con información medida durante 12 años corridos en la región de estudio. Los resultados denotaron que al utilizar base de datos, se corre el riesgo de no tener completa seguridad para alcanzar la temperatura deseada al inicio del horario laboral, mientras que la app meteorológica sí lo logró. Sin embargo, en la realidad no necesariamente una app meteorológica va a tener un 100 % de efectividad en su predicción, pero sí podrá tener una concepción más certera sobre el comportamiento climático real, ya que son predicciones que se realizan con una plazo previo a la ocurrencia reducido.
- La segunda mejora que se estudió, buscó disminuir los costos de operación de la nano red, utilizando la temperatura y el sistema HVAC como un ESS en base a energía térmica. Los resultados no fueron del todo satisfactorios, dado que al solicitar una temperatura específica al sistema HVAC, este no necesariamente podrá alcanzar con facilidad dicho valor, ya que va a depender de las condiciones instantáneas que se produzcan en el sistema (diferencia de temperaturas interna/externa, radiación al momento de iniciar la operación, radiación, etc.). Al mismo tiempo, al apagar el sistema HVAC la temperatura varía rápidamente en dirección a su estado de equilibrio con el entorno, produciendo un rápido cambio de temperatura en un corto periodo de tiempo, a partir de lo cual se pudo demostrar que el almacenamiento térmico dentro de la habitación no es lo suficientemente prolongado como para hacer uso de él con el afán de reducir el tiempo de funcionamiento del sistema HVAC.
- En un análisis posterior del comportamiento térmico en la habitación estudiada, se constató que la carga y descarga térmica de esta actúa de manera exponencial en el tiempo, lo que quiere decir que la variación de temperatura es más rápida en la medida que esta se eleva dentro de la habitación. Incluido esto, también se obtuvieron resultados para el Factor de Decremento y el Tiempo de Retraso, que verifican la existencia de una inercia térmica entre el interior y el exterior de la habitación de estudio.
- Para comprender mejor el fenómeno de almacenamiento térmico, se procedió a conocer las nociones básicas que describen el comportamiento dinámico de la temperatura al interior de una habitación. Se desarrolló el modelo algebraico que define el flujo de calor dentro de la habitación, logrando describir para cortos periodos de tiempo el uso del sistema HVAC como una ecuación diferencial de primer orden del tipo:

$$\dot{T} = -0,002 \cdot T + 0,2382 \cdot u + 15,93$$

En donde la variable  $T$  corresponde a la temperatura en la zona de estudio, la variable  $u$  esta ligada a la temperatura de contienda con que se usa el sistema HVAC, y los coeficientes  $A = -0,002$ ,  $B = 0,2382$  y  $C = 15,93$  se ajustan a las condiciones externas como las temperaturas en zonas adyacentes, radiación solar, además de incorporar la resistencia térmica que se produce entre dos zonas diferentes. Esta ecuación si bien no es una norma general para la habitación, entrega una noción básica sobre el uso de sistemas térmicos para fines de almacenamiento energético.

- La tercera y última mejora, fue similar a la segunda en objetivo y método, pero utilizó como base de almacenamiento el ESS de baterías que posee la nano red. Como respuesta a esta mejora se obtuvo una disminución monetaria del 17,5 %, 14,2 % y 41,8 % para la simulación del día 13/02/2018, la semana de verano y la semana de invierno respectivamente.

Si bien la evaluación económica sólo consideró el valor por suministro de energía fijado en diciembre de 2018, el resultado sigue representando un ahorro notorio si es extrapolado al largo plazo. Para meses de invierno sería posible ahorrar cerca de 5,465\$ por mes de operación de la nano red sólo en una habitación controlada por el sistema EMS y la lógica de control homeostático estudiada.

- Posterior a estas mejoras se analizó el método reactivo de la nano red ante contingencias en la red de distribución, en donde se expuso la necesidad de definir el claro control secundario que gobierne y opere la nano red, ya que existen diversos escenarios en donde el EMS deberá tomar la decisión de si debe continuar su ciclo de operación o si debe simplemente abrir o cerrar definitivamente un circuito en la nano red, para mantener la seguridad y aumentar la vida útil de los equipos en operación.

En este contexto, surgió un problema cuando las baterías se descargaron hasta el 20 % de su capacidad, y el EMS apagó el sistema HVAC para disminuir el consumo local. Al ocurrir esto, las baterías comenzaron a cargarse producto de la energía generada por el sistema DER. Sin embargo, dado que esta generación es completamente variable y está sujeta a variables ambientales, el EMS no puede confiarse inmediatamente de la energía producida y almacenada, para volver a operar el sistema HVAC. Por otra parte, si el ESS es cargado completo nuevamente después de haberse producido un ciclo de descarga, será posible volver a operar el sistema HVAC sin problema, pero si esto ocurre nuevamente, se tendrá que definir cuál es el límite de ciclos que operará el EMS para no dejarlo en un ciclo infinito.

Para fines de este trabajo, el límite de ciclos escogido para la carga y descarga de baterías, ante la presencia de una contingencia permanente en la nano red, fue de 2 ciclos. Una vez definidas las condiciones de operación ante una caída de la red, fue posible realizar una mejora del sistema de provisión de energía mediante el uso de baterías, permitiendo extender el tiempo de abastecimiento de energía.

## 7.2. Comentarios Finales

- En cuanto a los modelos utilizados, el modelo TRNSYS, si bien fue considerado como un modelo con 100 % de efectividad, la realidad es diferente, y objetivamente para el desarrollo de la lógica de control y la obtención de resultados, es necesario poder trabajar este modelo para desarrollarlo y analizarlo como un solo sistema de ecuaciones.

Cabe destacar, que el modelo térmico en TRNSYS, cuando fue desarrollado, fue calibrado para días de verano, por lo que no existe garantía por parte del autor y desarrollador de dicho programa, de que el trabajo del sistema HVAC como bomba de calor sea completamente idéntico a la realidad.

- Una de las dificultades de este trabajo, es que no sólo fue necesario poner a trabajar y analizar el algoritmo de control para poder crear diferentes escenarios, sino que

también, fue necesario simular la base (el día) a partir del modelo TRNSYS, para luego trasladarse a SIMULINK e ir alternando entre ambos hasta converger en una solución. Es por este motivo que los tiempos de simulación por día fue de aproximadamente  $\approx 1$  [hr], considerando que cada paso temporal para definir la operación del sistema HVAC, tardaba 6 [s] en simular, y abarcaba 90 [s] del día de simulación.

- Pese a dichas dificultades, los resultados obtenidos cumplen el objetivo de desarrollar un esquema de control para una nano red, que busque por objetivo principal mantener temperatura de confort dentro de la habitación. Los tiempos de simulación para cada paso temporal son suficientemente pequeños para que el sistema sea implementado y analizado bajo una dinámica térmica real.
- También se realizó el análisis de costos de la operación y se implementó una mejora a partir del uso del ESS, que logró mejorar la operación global y costos resultantes de la nano red.

# Apéndice 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**



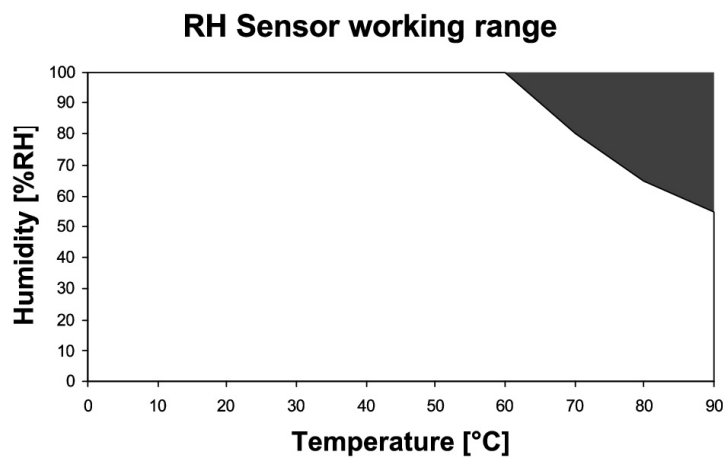
CÓDIGO	A6041928
Mide humedad condensada	NO
Aplicación	Ambiental/ductos
Rango humedad	0 + 100 % HR (4-20mA)
Exactitud humedad	±3 % HR
Rango temperatura trabajo	-20 + 80 °C (4-20 mA)
Exactitud temperatura	±0,4 °C
Alimentación	12 - 24 VDC
Tamaño	300 x Ø6 mm
Largo cable	3 m

*Figura A.2: Datasheet 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.



### ***Accuracy***

$\pm 3\%$  RH at 25°C.

Temperature Dependency is low.

Resolution is better than 0.5% RH.

## 10

*Figura A.3: Datasheet sensor de humedad Tinytag.*

# Gemini Data Sheet

## Tinytag Plus High Res. Range G for Probe

**TG12-0020**

Issue 4: 31<sup>st</sup> March 2000  
E80E



### 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

### 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.

### 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.

### 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

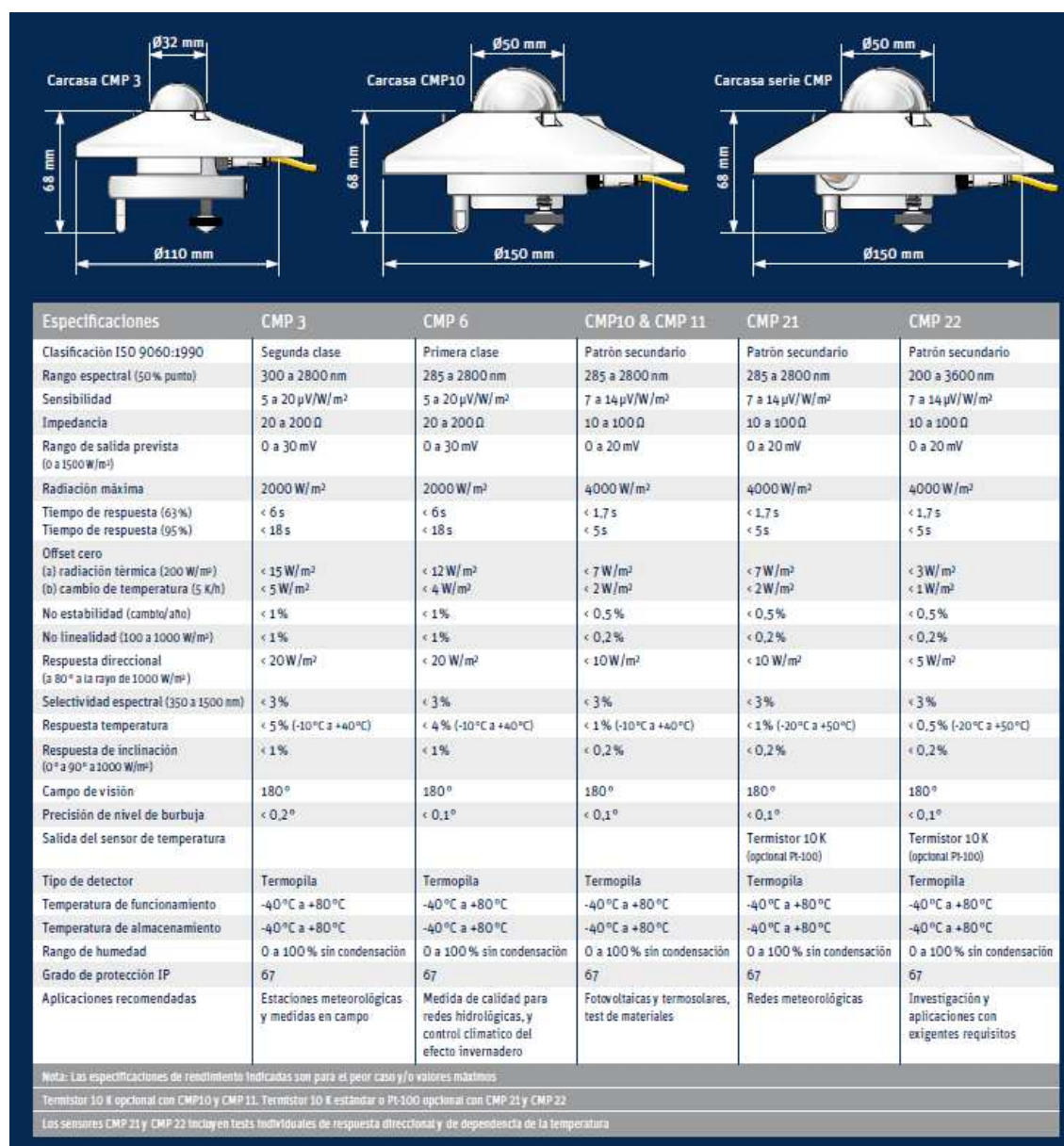
Gemini Data Loggers UK Ltd  
UK

Gemini Data Loggers Inc  
USA

<http://www.geminidataloggers.com>

e-mail: [sales@geminidataloggers.com](mailto:sales@geminidataloggers.com)

Figura A.4: Datasheet sensor de temperatura Tinytag.



*Figura A.5: Datasheets piranómetros CMP Kipp & Zonen.*

**Power measurement (P – Active, S – Apparent, Q – Reactive, D – Distorting)**

- Measuring range: see V rms and A rms measurement
- Power errors are calculated by adding the errors of voltage and current
- Additional error due to power factor PF
- Specified error  $\times (1 - |PF|)$
- Maximum range with voltage range 830 V delta-connection and 3000 A current range is 2.490 MW, higher displayed values possible when using PTs and CTs with ratio feature

Intrinsic error	$\pm (0.7 \% \text{ of m.v.} + 15 \text{ digit})$
Resolution	1 kW
Operating error	$\pm (1.5 \% \text{ of m.v.} + 20 \text{ digit})$

- Typical range with voltage range 230 V wye connection and 150 A current range is 34.50 KW.

Intrinsic error	$\pm (0.7 \% \text{ of m.v.} + 15 \text{ digit})$
Resolution	1 W to 10 W
Operating error	$\pm (1.5 \% \text{ of m.v.} + 20 \text{ digit})$

The errors of the current sensors themselves have not been considered.

**Energy measurement (kWh, kVAh, kVARh)**

Intrinsic error	$\pm (0.7 \% \text{ of m.v.} + F \text{ variation error}^* + 15 \text{ digit})$
Resolution	1 W to 10 W
Operating error	$\pm (1.5 \% \text{ of m.v.} + F \text{ variation error}^* + 20 \text{ digit})$

\*Frequency variation error

**PF (Power factor)**

Range	0.000 to 1.000
Resolution	0.001
Accuracy	$\pm 1 \% \text{ of full scale}$

**Frequency measurement**

Measuring range	46 Hz to 54 Hz and 56 Hz to 64 Hz
Intrinsic error	$\pm (0.2 \% \text{ of m.v.} + 5 \text{ digit})$
Operating error	$\pm (0.5 \% \text{ of m.v.} + 10 \text{ digit})$
Resolution	0.01 Hz

*Figura A.6: Analizador de redes FLUKE 1735.*

## ELECTRICAL PARAMETERS

TYPE		HR-300W	HR-305W	HR-310W	HR-315W	HR-320W	HR-325W	HR-330W
<b>STC</b> AM 1.5, 1000W/m <sup>2</sup> , Module Temperature 25°C	Rated Max. Power at STC (W)	300	305	310	315	320	325	330
	Max. Power Voltage / V <sub>mp</sub> (V)	36.30	36.61	36.82	36.98	37.08	37.19	37.25
	Max. Power Current / I <sub>mp</sub> (A)	8.26	8.33	8.42	8.52	8.63	8.74	8.86
	Open Circuit Voltage / V <sub>oc</sub> (V)	44.82	44.91	45.05	45.29	45.53	45.72	45.94
	Short Circuit Current / I <sub>sc</sub> (A)	8.88	8.99	9.10	9.11	9.22	9.31	9.41
	Module Efficiency (%)	15.49	15.75	16.01	16.27	16.53	16.78	17.04
<b>NOCT</b> AM 1.5, 800W/m <sup>2</sup> , Ambient Temperature 20°C, Wind Speed 1m/s	Rated Max. Power at NOCT (W)	216.2	219.8	223.1	226.4	230.0	233.40	237.5
	Max. Power Voltage / V <sub>mp</sub> (V)	33.00	33.10	33.20	33.30	33.47	33.58	33.64
	Max. Power Current / I <sub>mp</sub> (A)	6.55	6.64	6.72	6.80	6.87	6.95	7.06
	Open Circuit Voltage / V <sub>oc</sub> (V)	40.90	41.00	41.10	41.20	41.30	41.40	41.50
	Short Circuit Current / I <sub>sc</sub> (A)	7.18	7.27	7.35	7.44	7.53	7.62	7.73
	Module Efficiency (%)	13.96	14.19	14.40	14.61	14.84	15.07	15.33
Temperature Coefficient of P <sub>m</sub>		-0.44%/°C						
Temperature Coefficient of V <sub>oc</sub>		-0.32%/°C						
Temperature Coefficient of I <sub>sc</sub>		+0.055%/°C						
Nominal Operating Cell Temperature		45°C±3°C						
Output Tolerance		0~5W						

*Figura A.7: Datasheet paneles fotovoltaicos 320W, Jiangyin Hareon Power.*

Item	600W	1000W	1500W
Diámetro de Pala	2.4m	2.8m	3m
Material de las palas	Fibra de vidrio reforzada	Fibra de vidrio reforzada	Fibra de vidrio reforzada
Velocidad normal del rotor	400r/min	360r/min	360r/min
Velocidad de viento normal	8m/s	8m/s	8m/s
Potencia Normal	600W	1000W	1500W
Máxima potencia	720w	1200w	1700w
Max torque de arranque (n/m)	¿ 0.3	¿ 0.4	¿ 0.4
Voltaje de salida	24V	48V	48V
Velocidad de viento de arranque	2.5(m/s)	2.5(m/s)	2.5(m/s)
Velocidad de viento de trabajo	3-25(m/s)	3-25(m/s)	3-25(m/s)
Velocidad de viento de seguridad	50(m/s)	50(m/s)	50(m/s)
Altura de torre y lingas provistas	6(m)	6(m)	6(m)
Tipo de generador	Trifásico AC PM, fundición de acero	Trifásico AC PM, fundición de acero	Trifásico AC PM, fundición de acero
Peso del equipo	44kg	55kg	58kg
Banco de baterías sugerido	4pcs 12v88ah	8 pcs 12v105Ahh (4 serie + 2 paralelo)	8 pcs 12v105Ahh (4 serie + 2 paralelo)
	4 pcs 6V 250Ah	8 pcs 6V 250Ah (8 serie)	8 pcs 6V 250Ah (8 serie)
Vida sugerida del equipo	>15 años	>15 years	>15 años
Sistema de control de salida	Controlador Solar-Eólico tipo PWM	Controlador Solar-Eólico tipo PWM	Controlador Solar-Eólico tipo PWM
Panel solar acepado por el controlador	1 paneles de 24V 200w en serie (200W)	48v200w--400w	2 paneles de 24V 200w en serie (400W)
	2 paneles de 12V 100W en serie (200W)	4 paneles de 12V 100W en serie (400W)	4 paneles de 12V 100W en serie (400W)
Clase de la aislación	B	B	B
Material of enclosure	20# tubo sin costura	20# tubo sin costura	20# tubo sin costura
Tipo de magneto	neodymium-iron-boron 38sh	neodymium-iron-boron 38sh	neodymium-iron-boron 38sh
Material del stator	QZY-2/180/470	QZY-2/180/470	QZY-2/180/470
Prevención de la corrosión	Pintura zincada	Pintura zincada	Pintura zincada
Forma de las aspas	3 FRP	3 FRP	3 FRP
Protección contra sobre velocidad	Mecanismo de protección electromagnética	Mecanismo de protección electromagnética	Mecanismo de protección electromagnética
	eje de protección de cola contra presión del viento	eje de protección de cola contra presión del viento	eje de protección de cola contra presión del viento
Carga soportada (ejemplo) varía de acuerdo a viento disponible	Heladera, lavarropas, bomba de agua, cocina eléctrica, TV, iluminación, ventilador eléctrico, cargadores de celulares, notebooks.		

*Figura A.8: Datasheet equipo aerogenerador 1500W, Hissuma Solar.*





Figura A.9: Datasheet baterías Curtiss Technologies.



# Apéndice B

## Mediciones y Data

	Temperatura Externa [°C]						Radiación Solar [ $W/m^2$ ]					
Hora	10/02	11/02	12/02	13/02	14/02	15/02	10/02	11/02	12/02	13/02	14/02	15/02
0:00	17,58	15,32	14,92	18,66	16,67	17,93	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1:00	16,12	13,79	15,59	17,35	15,65	16,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2:00	14,62	12,53	15,04	16,39	15,17	15,65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3:00	12,69	12,08	14,45	16,13	14,33	15,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4:00	12,11	11,79	14,43	16,52	13,67	15,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5:00	11,13	12,05	13,62	16,21	13,43	14,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6:00	10,59	12,52	13,89	16,17	12,82	13,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7:00	10,74	11,64	14,07	16,02	12,87	13,40	3,01	3,18	3,18	4,07	7,09	5,14
8:00	13,20	13,36	16,56	17,79	14,68	15,60	177,56	175,41	174,34	162,69	142,63	141,02
9:00	21,79	21,84	24,46	25,19	20,04	21,34	390,47	392,98	392,80	368,95	337,22	337,40
10:00	24,52	24,66	28,09	29,05	23,08	25,13	591,33	594,56	595,10	565,14	527,11	529,44
11:00	27,32	27,88	31,63	31,52	26,52	28,74	753,19	764,32	766,83	720,71	689,48	695,58
12:00	29,84	30,88	34,84	32,72	29,09	30,76	872,59	882,28	884,26	860,19	813,87	813,69
13:00	31,66	35,05	37,23	33,94	31,84	33,00	961,85	953,59	927,90	918,20	883,36	887,13
14:00	33,89	36,30	39,46	35,00	33,63	34,53	988,61	966,70	946,22	929,52	899,88	907,60
15:00	37,35	38,97	41,62	38,27	36,36	36,62	933,29	925,92	916,76	882,10	847,44	866,12
16:00	35,62	37,00	39,83	35,94	34,99	34,61	810,11	818,90	814,41	772,58	750,14	761,09
17:00	32,09	34,21	35,89	32,11	32,36	31,55	461,03	656,46	655,92	616,62	602,27	606,76
18:00	28,58	32,64	33,50	29,61	30,74	29,66	202,64	451,43	454,12	415,75	403,20	404,63
19:00	27,05	30,53	31,17	26,40	28,35	27,74	166,99	235,25	218,05	178,64	185,09	182,58
20:00	24,38	26,55	26,79	22,32	24,46	24,08	43,19	32,46	23,16	18,51	17,80	16,55
21:00	20,92	22,54	23,00	19,78	21,59	21,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22:00	18,79	17,80	18,85	18,28	19,81	19,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
23:00	16,96	14,55	18,74	17,43	18,64	18,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

**Tabla B.1:** Temperatura externa y radiación solar medidas en zona de estudio en periodo de verano.

	Temperatura Externa [°C]						Radiación Solar [W/m <sup>2</sup> ]					
Hora	07/07	08/07	09/07	10/07	11/07	12/07	07/07	08/07	09/07	10/07	11/07	12/07
0:00	8,52	10,54	9,76	8,47	7,98	7,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1:00	8,44	10,25	9,06	7,73	7,84	6,62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2:00	8,10	9,43	8,63	6,78	7,81	5,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3:00	7,46	9,25	8,11	5,95	7,85	5,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4:00	7,15	8,55	7,47	4,91	7,83	5,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5:00	6,85	8,30	7,01	4,83	7,64	5,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6:00	6,40	8,13	6,34	5,23	7,37	5,66	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7:00	6,57	7,42	6,33	5,10	7,26	5,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8:00	5,75	7,11	6,56	5,33	7,51	5,74	0,94	1,04	1,48	0,11	0,15	0,79
9:00	6,26	7,76	7,37	5,36	7,69	6,64	36,35	90,86	89,56	16,67	22,05	65,76
10:00	7,17	10,49	11,13	5,73	7,98	9,25	217,12	255,17	269,55	42,78	78,18	253,79
11:00	10,26	13,21	13,28	6,22	8,06	10,83	378,40	417,03	425,91	74,37	120,41	367,15
12:00	12,34	14,78	17,29	6,51	8,74	13,19	516,56	523,15	541,07	88,59	239,88	494,72
13:00	14,15	16,30	20,46	7,42	10,73	15,41	564,77	572,88	584,13	138,82	536,13	526,77
14:00	15,25	18,41	21,77	7,98	11,97	16,74	560,43	558,81	579,24	106,55	518,73	379,09
15:00	16,42	20,47	22,90	8,43	13,60	17,49	487,58	492,37	498,29	75,97	445,86	348,07
16:00	17,37	21,44	23,41	8,45	14,49	18,74	359,36	361,62	369,16	35,81	317,77	270,20
17:00	17,58	21,46	23,26	8,05	13,95	18,06	182,11	187,98	192,06	13,34	152,73	81,43
18:00	15,27	19,23	20,53	7,81	12,36	16,56	25,55	31,85	29,07	1,88	23,57	18,67
19:00	13,18	15,59	16,13	7,76	10,50	15,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20:00	12,00	13,38	14,33	8,05	9,41	13,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21:00	11,68	12,55	12,47	8,06	8,97	11,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22:00	11,03	11,16	10,72	7,97	8,17	9,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
23:00	10,69	10,44	9,82	8,15	7,72	9,23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

**Tabla B.2:** Temperatura externa y radiación solar medidas en zona de estudio en periodo de invierno.

	Velocidad Viento [ $m/s$ ]		Explorador Solar	
Hora	Verano	Invierno	Temperatura Externa [ $^{\circ}C$ ]	Radiación Solar [ $W/m^2$ ]
0:00	1,6	2,7	15,91	0,00
1:00	1,7	2,7	15,28	0,00
2:00	1,8	2,7	14,54	0,00
3:00	1,9	2,8	13,96	0,00
4:00	1,9	2,8	13,29	0,00
5:00	1,9	2,8	12,54	0,00
6:00	2,0	2,9	11,86	0,00
7:00	2,0	2,9	14,11	85,73
8:00	1,7	2,9	16,62	268,82
9:00	1,5	2,6	19,71	476,20
10:00	2,0	2,5	22,67	653,54
11:00	3,9	2,3	25,38	791,76
12:00	4,8	2,3	26,51	882,18
13:00	5,5	2,5	27,57	915,16
14:00	5,8	2,6	28,52	880,23
15:00	5,9	2,5	27,87	786,30
16:00	5,8	2,0	27,11	651,21
17:00	5,5	1,5	26,29	463,57
18:00	5,0	1,6	24,83	254,01
19:00	4,5	2,2	22,57	67,81
20:00	3,0	2,5	20,51	0,00
21:00	1,5	2,6	18,74	0,00
22:00	1,3	2,7	17,32	0,00
23:00	1,5	2,7	16,31	0,00

**Tabla B.3:** Velocidad del viento medida y parámetros extraídos del explorador solar.

	Consumo Cargas sin HVAC [W]					
Hora	Sabado	Domingo	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves
0:00	19,84	19,92	19,76	19,73	20,18	19,60
1:00	19,97	19,63	19,76	19,60	20,07	19,52
2:00	19,76	19,76	19,45	19,55	19,99	19,50
3:00	19,50	19,76	19,45	19,47	19,89	19,47
4:00	19,68	19,76	19,47	19,45	19,76	19,55
5:00	19,73	19,71	19,45	19,42	19,68	19,47
6:00	19,55	19,63	19,39	19,37	19,52	19,47
7:00	19,45	19,52	19,42	19,37	19,47	19,37
8:00	19,52	19,52	19,37	19,34	19,55	19,37
9:00	19,79	19,73	353,78	19,34	19,45	19,34
10:00	18,16	17,33	342,15	20,67	20,99	78,77
11:00	15,68	16,49	343,59	51,65	214,50	341,37
12:00	14,37	13,96	367,29	346,15	340,77	344,11
13:00	16,62	15,63	365,80	344,66	58,62	344,53
14:00	14,35	6,12	373,72	346,88	344,27	294,61
15:00	14,09	19,73	379,11	342,44	342,57	428,09
16:00	16,28	14,17	374,04	383,58	344,45	371,21
17:00	14,90	12,65	361,13	402,63	167,59	371,74
18:00	15,16	15,24	156,50	338,91	18,53	368,84
19:00	17,80	15,97	16,88	19,63	16,57	367,95
20:00	19,47	17,35	18,37	18,56	16,65	55,80
21:00	19,63	19,86	19,39	19,60	18,95	19,76
22:00	19,73	19,65	19,63	19,73	19,34	19,63
23:00	20,02	19,84	19,58	19,99	19,58	19,55

*Tabla B.4: Consumo de cargas en zona de estudio.*

Aire Acondicionado			Bomba de Calor	
Hora	Tiempo de Respuesta [ <i>min</i> ]	Variación de Temperatura [ $^{\circ}C$ ]	Tiempo de Respuesta [ <i>min</i> ]	Variación de Temperatura [ $^{\circ}C$ ]
8:00:00	12	1,48	124	6,13
12:00:00	36	3,19	200	6,63
16:00:00	48	3,82	220	6,43
19:00:00	42	4,16	330	6,61
22:00:00	66	4,46	486	7,06

**Tabla B.5:** Tiempo de respuesta desde el encendido del equipo HVAC hasta alcanzar consigna de 20 [ $^{\circ}C$ ].

# Apéndice C

## Códigos en Matlab

```
1 function [pv_v , pv_i , pr] = fcn (irrad , temper)
2
3 persistent k
4 persistent pvtempindex
5 persistent pvirindex
6 persistent vtab
7 persistent itab
8
9 if isempty(k)
10     k=1;
11
12     pvtempindex=[-10 0 10 20 30 40 45];
13     pvirindex=[10;20;30;40;50;60;...;970;980;990;1000];
14
15     vtabmin10=[75.9653879568009;...;85.8307253448803];
16     vtab0=[72.2561054837759;...;82.6390921931532];
17     vtab10=[68.5598428387137;...;79.4740988857731];
18     vtab20=[64.8737131968682;...;76.2940160147550];
19     vtab30=[61.2034943159471;...;73.0997202966122];
20     vtab40=[57.5507924204065;...;69.9350850950156];
21     vtab45=[55.7331590865500;...;68.3911139279196];
22     itabmin10=[0.0854086948572529;...;8.50553219591613];
23     itab0=[0.0855979201899054;...;8.52726110506392];
24     itab10=[0.0857497645252372;...;8.54453154901737];
25     itab20=[0.0858647297387808;...;8.56162063376273];
26     itab30=[0.0859317358508100;...;8.57860637261288];
27     itab40=[0.0859436679701526;...;8.59030435025730];
28     itab45=[0.0859239091039084;...;8.59059074192093];
29
30     vtab=[vtabmin10 , vtab0 , vtab10 , vtab20 , vtab30 , vtab40 , vtab45];
31     itab=[itabmin10 , itab0 , itab10 , itab20 , itab30 , itab40 , itab45];
32 end
33
34 % line express irradiance
35 % column express temperature
36
37 columnnum1=find (pvtempindex>temper , 1) ;
38 columnnum0=columnnum1-1;
39 linenum1=find (pvirindex>irrad , 1) ;
40
41 if (linenum1>=2)
```

```

42     linenum0=linenum1-1;
43 else
44     linenum1=2;
45     linenum0=linenum1-1;
46 end
47
48 % Interpolate for requested irradiance
49 % (for two temperatures around requested temperature)
50
51 v00=vtab(linenum0,columnnum0);
52 v10=vtab(linenum1,columnnum0);
53 v01=vtab(linenum0,columnnum1);
54 v11=vtab(linenum1,columnnum1);
55
56 i00=itab(linenum0,columnnum0);
57 i10=itab(linenum1,columnnum0);
58 i01=itab(linenum0,columnnum1);
59 i11=itab(linenum1,columnnum1);
60
61 fil0=pvirindex(linenum0);
62 fil1=pvirindex(linenum1);
63
64 col0=pvtempindex(1,columnnum0);
65 col1=pvtempindex(1,columnnum1);
66
67 v_t0=v00+(v10-v00)*(irrad-fil0)/(fil1-fil0);
68 v_t1=v01+(v11-v01)*(irrad-fil0)/(fil1-fil0);
69
70 i_t0=i00+(i10-i00)*(irrad-fil0)/(fil1-fil0);
71 i_t1=i01+(i11-i01)*(irrad-fil0)/(fil1-fil0);
72
73 % Interpolate values for requested temperature
74 vfinal=v_t0+(v_t1-v_t0)*(temper-col0)/(col1-col0);
75 ifinal=i_t0+(i_t1-i_t0)*(temper-col0)/(col1-col0);
76
77 if (ifinal < 0)
78     ifinal=0;
79 end
80
81 % Outputs
82 pv_v=vfinal(1,1);
83 pv_i=ifinal(1,1);
84 pr=1; %0.8047 Caso real.
85 end

```

*Listing C.1: Bloque Solar+MPPT*

```

1 function poteol = fcn(velvient)
2
3 persistent eolvelindex
4 persistent eolpotindex
5
6 eolvelindex=[1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15];
7 eolpotindex=[0 30 80 120 250 470 760 1000 1100 1190 1220 1210 1140 1010
8             880];
9 eolpotindex=eolpotindex*1.5;
10
11 column1=find(eolvelindex>velvient,1);
12 column0=column1-1;

```

```

12
13 v0=eolvelindex(1,column0);
14 v1=eolvelindex(1,column1);
15 p0=eolpotindex(1,column0);
16 p1=eolpotindex(1,column1);
17
18 vt=p1-((p1-p0)/(v1-v0))*v1;
19 p=((p1-p0)/(v1-v0))*velvient+vt;
20 poteol=p(1,1);
21 end

```

*Listing C.2: Bloque Aerogenerador*

```

1 function [power,opac]= fcn(onc,onp)
2
3 % Si onc esta en 1 hay operación, si no no hay consumo ni aire
  % acondicionado.
4 % Mientras haya operación, el que manda es onp.
5
6 persistent opd
7
8 if isempty(opd)
9     opd=0;
10 end
11
12 persistent opc
13
14 if isempty(opc)
15     opc=0;
16 end
17
18 if onc==1
19     if onp==1
20         power=1800;
21     else
22         power=0;
23     end
24 else
25     power=0;
26 end
27
28 if power>50
29     opd=1;
30 else
31     opd=0;
32 end
33
34 opc=opc+opd;
35 opac=opc;
36
37 end

```

*Listing C.3: Bloque HVAC*

```

1 function ongrid = fcn(netOk,controlongrid)
2
3 if (netOk==1) && (controlongrid==1)
4     ongrid=1;
5 else

```



```

6         ongrid=0;
7
8     end

```

**Listing C.4:** Bloque On//Off Grid

```

1     function [Pnetparc , BatCharge , PotBatConsumpt , Ploadf] = fcn (Psol , Peol , Pload ,
2         ongrid , alarm)
3
4     if ongrid==1
5         BatCharge=1;
6         Pnetparc=Pload-(Psol+Peol);
7         PotBatConsumpt=0; %Free charge (grid energy available)
8         Ploadf=Pload;
9     else
10        Pnetparc=0;
11        if alarm==0
12            PotBatConsumpt=Pload-(Psol+Peol);
13            Ploadf=Pload;
14            if PotBatConsumpt>0
15                BatCharge=0;
16            else
17                BatCharge=1;
18                PotBatConsumpt=(Psol+Peol)-Pload;
19            end
20        else
21            PotBatConsumpt=(Psol+Peol)-Pload;
22            if PotBatConsumpt>0
23                BatCharge=1;
24                PotBatConsumpt=(Psol+Peol)-Pload;
25                Ploadf=Pload;
26            else
27                BatCharge=0;
28                PotBatConsumpt=0;
29                Ploadf=(Psol+Peol);
30            end
31        end
32    end
33 end

```

**Listing C.5:** Bloque Solar Hybrid System

```

1     function pnettotal = fcn(pnetparcial , pbat , ongrid)
2
3     if ongrid==1
4         pnettotal=pnetparcial+pbat;
5     else
6         pnettotal=0;
7
8     end

```

**Listing C.6:** Bloque Pnet total

```

1     function [costos , contactOnGrid , contactBat , contactHVAC] = fcn (
2         operation_time , pow_ac , soc_batST , soc_tot , gridOK)
3
4     %Evaluación de operación On/Off Grid
5     persistent k
6     if isempty(k)

```

```

7      k=0;
8  end
9
10 if operation_time >=64800 && operation_time <79200
11     if k==0
12         if soc_tot >=10
13             contactOnGrid=0;
14         else
15             contactOnGrid=1;
16             k=1;
17         end
18     else
19         if soc_tot <=90
20             contactOnGrid=1;
21         else
22             contactOnGrid=0;
23             k=0;
24         end
25     end
26 else
27     contactOnGrid=1;
28 end
29
30 persistent j1
31 if isempty(j1)
32     j1=0;
33 end
34 persistent j2
35 if isempty(j2)
36     j2=0;
37 end
38
39 % Evaluación de consumo
40 if gridOK==0
41     if soc_batST <20
42         contactHVAC=0;
43         j1=1;
44     elseif soc_batST >=90
45         contactHVAC=1;
46         if j1==1
47             j2=1;
48         else
49             j2=0;
50         end
51     else
52         if j1==0 && j2==0
53             contactHVAC=1;
54         elseif j1==1 && j2==1
55             contactHVAC=1;
56         else
57             contactHVAC=0;
58         end
59     end
60 else
61     j1=0;
62     j2=0;
63     contactHVAC=1;
64 end
65

```

```

66 %Evaluación baterías
67 if soc_batST>=90
68     if ongrid==1
69         contactBat=0;
70     else
71         contactBat=1;
72     end
73 elseif soc_batST<20
74     if ongrid==1
75         contactBat=1;
76     else
77         if contactHVAC==0
78             contactBat=1;
79         else
80             contactBat=0;
81         end
82     end
83 else
84     contactBat=1;
85 end
86
87 %Evaluación de costos
88
89 persistent contador_potencia
90 persistent cont_pot_h
91 persistent pot_consumption
92 persistent n
93 persistent contador_costos
94 persistent tarifav
95 persistent tarifaf
96
97 if isempty(contador_potencia)
98     contador_potencia=0;
99 end
100 if isempty(cont_pot_h)
101     cont_pot_h=0;
102 end
103 if isempty(n)
104     n=1;
105 end
106 if isempty(pot_consumption)
107     pot_consumption=0;
108 end
109 if isempty(contador_costos)
110     contador_costos=0;
111 end
112 if isempty(tarifav)
113     tarifav=0;
114 end
115
116 tarifaf=59.658;
117 contador_potencia=pow_ac;
118
119 if operation_time<28800
120     tarifav=tarifaf*0.7;
121 elseif operation_time>=28800 && operation_time<64800
122     tarifav=tarifaf;
123 elseif operation_time>=64800 && operation_time<79200
124     tarifav=tarifaf*1.3;

```

```

125     else
126         tarifav=tarifaf*0.7;
127     end
128
129     if operation_time==3600*n
130         n=n+1;
131         pot_consumption=(contador_potencia-cont_pot_h)/3600;
132         contador_costos=contador_costos+(pot_consumption/1000)*tarifav;
133         cont_pot_h=contador_potencia;
134     end
135
136     costos=contador_costos;
137
138     end

```

*Listing C.7: Control block*

```

1  function [chok,disok] = fcn(SOCbat)
2
3  persistent chargeok; % histeresis 90 %
4  persistent dischargeok; % histeresis 10 %
5
6  if (isempty(chargeok))
7      if SOCbat<=100
8          chargeok=1;
9      else
10         chargeok=0;
11     end
12 end
13 if (isempty(dischargeok))
14     if SOCbat<=0
15         dischargeok=0;
16     else
17         dischargeok=1;
18     end
19 end
20
21 %Check zone of histeresis
22 if dischargeok==0
23     if SOCbat>10
24         dischargeok=1;
25     end
26 else
27     if SOCbat<0
28         dischargeok=0;
29     end
30 end
31 if chargeok==0
32     if SOCbat<90
33         chargeok=1;
34     end
35 else
36     if SOCbat>100
37         chargeok=0;
38     end
39 end
40
41 chok=chargeok;
42 disok=dischargeok;

```

*Listing C.8: Bloque Hysteresis Charge BU*

```

1 function [chok,disok] = fcn(SOCbat)
2
3 persistent chargeok; % hysteresis 90%
4 persistent dischargeok; % hysteresis 10 %
5
6 if (isempty(chargeok))
7     if SOCbat<=100
8         chargeok=1;
9     else
10        chargeok=0;
11    end
12 end
13 if (isempty(dischargeok))
14     if SOCbat<=0
15         dischargeok=0;
16     else
17         dischargeok=1;
18     end
19 end
20
21 % Check zone of hysteresis
22 if dischargeok==0
23     if SOCbat>10
24         dischargeok=1;
25     end
26 else
27     if SOCbat<0
28         dischargeok=0;
29     end
30 end
31 if chargeok==0
32     if SOCbat<90
33         chargeok=1;
34     end
35 else
36     if SOCbat>100
37         chargeok=0;
38     end
39 end
40
41 chok=chargeok;
42 disok=dischargeok;

```

*Listing C.9: Bloque Hysteresis Charge ST*

```

1 function [mode,ibatBU,ibatST,alarm,ibatBUc,ibatSTc] = fcn(BatCharge,
2     potbatconsumpt,swbatST,chBUok,disBUok,vbatBU,chSTok,disSTok,vbatST)
3
4 if (BatCharge==1) % Cargar baterías
5     mode=1;
6
7     if (potbatconsumpt==0) % Free charge at max rating (net energy
8         available)
9         if chBUok==1
10             ibatBUc=1; % something

```

```

9         ibatBU=5;
10    else
11        ibatBUc=0;
12        ibatBU=0;
13    end
14    if swbatST==1 && chSTok==1
15        ibatSTc=1; %something
16        ibatST=15;
17    else
18        ibatSTc=0;
19        ibatST=0;
20    end
21    alarm=0;
22 else
23     ibatBUc=0;
24     ibatSTc=0;
25     % Charge with available energy
26     if swbatST==1 && chSTok==1
27         if chBUok==1 %Charge both batteries
28             ibatBU=0.25*potbatconsumpt/vbatBU;
29             ibatST=0.75*potbatconsumpt/vbatST;
30         else %Charge only ST
31             ibatBU=0;
32             ibatST=potbatconsumpt/vbatST;
33         end
34     else
35         if chBUok==1 %Charge only BU
36             ibatBU=potbatconsumpt/vbatBU;
37             ibatST=0;
38         else
39             %Energy loss , not enough free battery capacity.
40             ibatBU=0;
41             ibatST=0;
42         end
43     end
44     alarm=0;
45 end
46
47 else % Alimentar cargas
48     ibatBUc=0;
49     ibatSTc=0;
50     mode=0;
51
52     % Cases: error (not enough energy), from one battery , from both.
53
54
55     if disBUok==1
56         if disSTok==1
57             ibatBU=-0.25*potbatconsumpt/vbatBU;
58             ibatST=-0.75*potbatconsumpt/vbatST;
59         else
60             ibatBU=-potbatconsumpt/vbatBU;
61             ibatST=0;
62         end
63         alarm=0;
64     else
65         if disSTok==1
66             ibatBU=0;
67             ibatST=-potbatconsumpt/vbatST;

```

```

68         alarm=0;
69     else
70         ibatBU=0;
71         ibatST=0;
72         alarm=1; %Not enough energy
73     end
74 end
75 end

```

*Listing C.10: Bloque Battery Current*

```

1  %Para ejecutar el programa siempre se debe ajustar la temperatura inicial
2  %y las temperaturas externas esperadas en TRNSYS.
3
4  %Inicia el programa
5
6  clear all
7  clc
8
9  date=datevec(datetime('now')); %Y,M,D,H,MN,S]
10 % dia=date(1,3);
11 % mes=date(1,2);
12 % ano=date(1,1);
13 dia=13;
14 mes=2;
15 ano=2018;
16
17 clear date
18
19 %%
20 %Primera Etapa – Obtención del comportamiento de temperatura interna
21
22 cd 'C:\Users\rmora\Desktop\Simulaciones\1_Verano_Scontrol';
23 [ambientalext,Tint]=simulatrnssys(); %Simula y genera archivo de
24 %entrada de datos de humedad, temperatura y radiación (ambientalext)
25 %para siguiente simulacion. Además de entregar vector de temperatura
26 %al interior de la sala.
27 Text=ambientalext(:,2)';
28 Tint=Tint';
29 cd 'C:\Users\rmora\Desktop\Simulaciones\0_Modelo_Lineal';
30
31 %%
32 %Segunda Etapa – Cálculo de una lógica de control para el aire
33 %acondicionado pre horario de oficina
34
35 T=0:960;
36 T=T*90; %Tiempo en segundos.
37 Cop=zeros(1,961); %Vector de operación para aire acondicionado.
38
39 cd 'C:\Users\rmora\Desktop\Simulaciones\1_Verano_Ccontrol';
40 Copd=Cop'; %Vector de control.
41 ambientalext=[ambientalext Copd]; %Aca se genera el archivo para
42 %simular con control
43 save('archivoambientall.txt','ambientalext','-ascii');
44 type('archivoambientall.txt'); %Guarda el archivo
45 for i=1:961
46     tcontrol(i,1)=23.5;
47 end
48 save('tcontrol1.txt','tcontrol','-ascii');

```

```

49 type('tcontrol1.txt'); %%%Guarda el archivo
50 [~,Tint2,~] = simulatrnssys2();
51 Tint2=Tint2';
52 cd 'C:\Users\rmora\Desktop\Simulaciones\0_Modelo_Lineal';
53
54 for i=0:400
55     if Tint2(1,400)>25.5 || Tint2(1,400)<23.5
56         Cop(1,400-i)=1;
57         cd 'C:\Users\rmora\Desktop\Simulaciones\1_Verano_Ccontrol';
58         Copd=Cop'; % Vector de control.
59         ambientalex(:,4)=Copd(:,1);
60         save('archivoambiental1.txt','ambientalex','-ascii');
61         type('archivoambiental1.txt'); % Guarda el archivo
62         [~,Tint2,~] = simulatrnssys2();
63         Tint2=Tint2';
64         cd 'C:\Users\rmora\Desktop\Simulaciones\0_Modelo_Lineal';
65     end
66 end
67
68 %%%
69 % Tercera Etapa – Cálculo de una lógica de control para el aire
70 % acondicionado en horario de oficina pre evento
71
72 for i=401:720
73     if Tint2(1,i)>25.5 || Tint2(1,i)<23.5
74         Cop(1,i-1)=1;
75         cd 'C:\Users\rmora\Desktop\Simulaciones\1_Verano_Scontrol';
76         Copd=Cop'; % Vector de control.
77         ambientalex(:,4)=Copd(:,1);
78         save('archivoambiental1.txt','ambientalex','-ascii');
79         type('archivoambiental1.txt'); % Guarda el archivo
80         [~,Tint2,~] = simulatrnssys2();
81         Tint2=Tint2';
82         cd 'C:\Users\rmora\Desktop\Simulaciones\0_Modelo_Lineal';
83     end
84 end
85
86 % Inercia Térmica
87 for i=0:720
88     if Tint2(1,720)>24.5
89         Cop(1,719-i)=1;
90         cd 'C:\Users\rmora\Desktop\Simulaciones\1_Verano_Ccontrol';
91         Copd=Cop'; % Vector de control.
92         ambientalex(:,4)=Copd(:,1);
93         save('archivoambiental1.txt','ambientalex','-ascii');
94         type('archivoambiental1.txt'); % Guarda el archivo
95         [~,Tint2,~] = simulatrnssys2();
96         Tint2=Tint2';
97         cd 'C:\Users\rmora\Desktop\Simulaciones\0_Modelo_Lineal';
98     end
99 end
100
101 %%%
102 % Cuarta Etapa – Simulación de la operación del día
103
104 for i=720:800
105     if Tint2(1,i)>25.5 || Tint2(1,i)<23.5
106         Cop(1,i-1)=1;
107         cd 'C:\Users\rmora\Desktop\Simulaciones\1_Verano_Scontrol';

```



```

108         Copd=Cop'; % Vector de control.
109         ambientalex(:,4)=Copd(:,1);
110         save('archivoambiental1.txt','ambientalex','-ascii');
111         type('archivoambiental1.txt'); % Guarda el archivo
112         [~,Tint2,~] = simulatrnssys2();
113         Tint2=Tint2';
114         cd 'C:\Users\rmora\Desktop\Simulaciones\0_Modelo_Lineal';
115     end
116 end
117
118 %simOut=sim('operation_day','ReturnWorkspaceOutputs','on');
119
120 %%
121 % Quinta Etapa – Proceso de actualización de datos
122
123 if dia==1
124     range='B2:B25';
125 elseif dia==2
126     range='C2:C25';
127 elseif dia==3
128     range='D2:D25';
129 elseif dia==4
130     range='E2:E25';
131 elseif dia==5
132     range='F2:F25';
133 elseif dia==6
134     range='G2:G25';
135 elseif dia==7
136     range='H2:H25';
137 elseif dia==8
138     range='I2:I25';
139 elseif dia==9
140     range='J2:J25';
141 elseif dia==10
142     range='K2:K25';
143 elseif dia==11
144     range='L2:L25';
145 elseif dia==12
146     range='M2:M25';
147 elseif dia==13
148     range='N2:N25';
149 elseif dia==14
150     range='O2:O25';
151 elseif dia==15
152     range='P2:P25';
153 elseif dia==16
154     range='Q2:Q25';
155 elseif dia==17
156     range='R2:R25';
157 elseif dia==18
158     range='S2:S25';
159 elseif dia==19
160     range='T2:T25';
161 elseif dia==20
162     range='U2:U25';
163 elseif dia==21
164     range='V2:V25';
165 elseif dia==22
166     range='W2:W25';

```

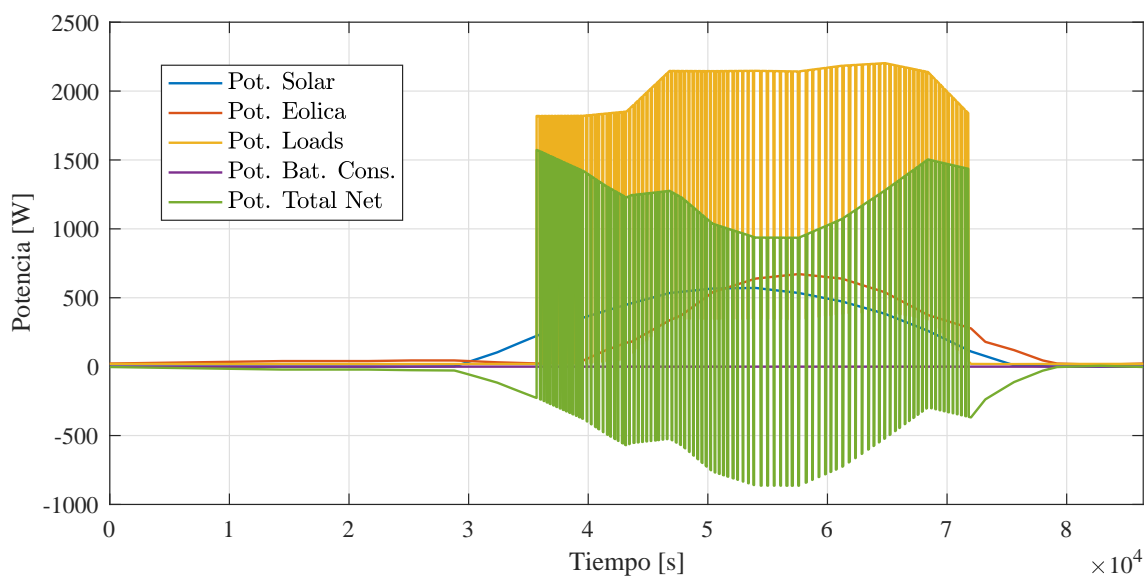
```
167 elseif dia==23
168     range='X2:X25';
169 elseif dia==24
170     range='Y2:Y25';
171 elseif dia==25
172     range='Z2:Z25';
173 elseif dia==26
174     range='AA2:AA25';
175 elseif dia==27
176     range='AB2:AB25';
177 elseif dia==28
178     range='AC2:AC25';
179 elseif dia==29
180     range='AD2:AD25';
181 elseif dia==30
182     range='AE2:AE25';
183 elseif dia==31
184     range='AF2:AF25';
185 end
186
187 filename = 'Base_de_Datos.xlsx';
188 xlswrite(filename,Text,mes+2,range)
189
190 clear filename; clear range;
```

**Listing C.11:** *Código en Matlab del modelo general de la nano red - Homeostasis Reactiva y Predictiva*

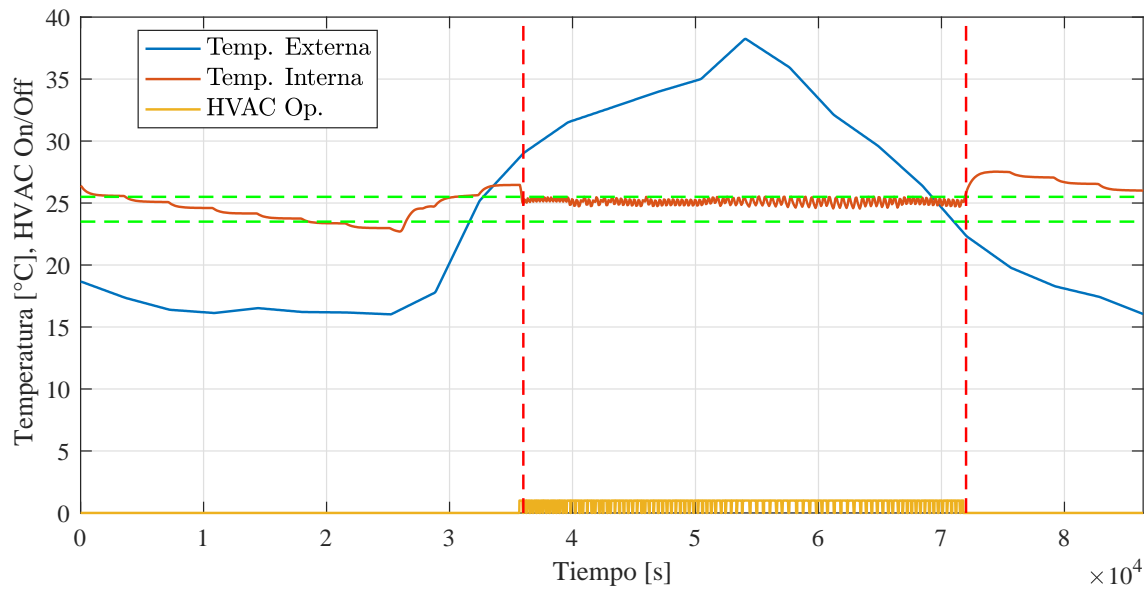
## Apéndice D

### Resultados Anexos

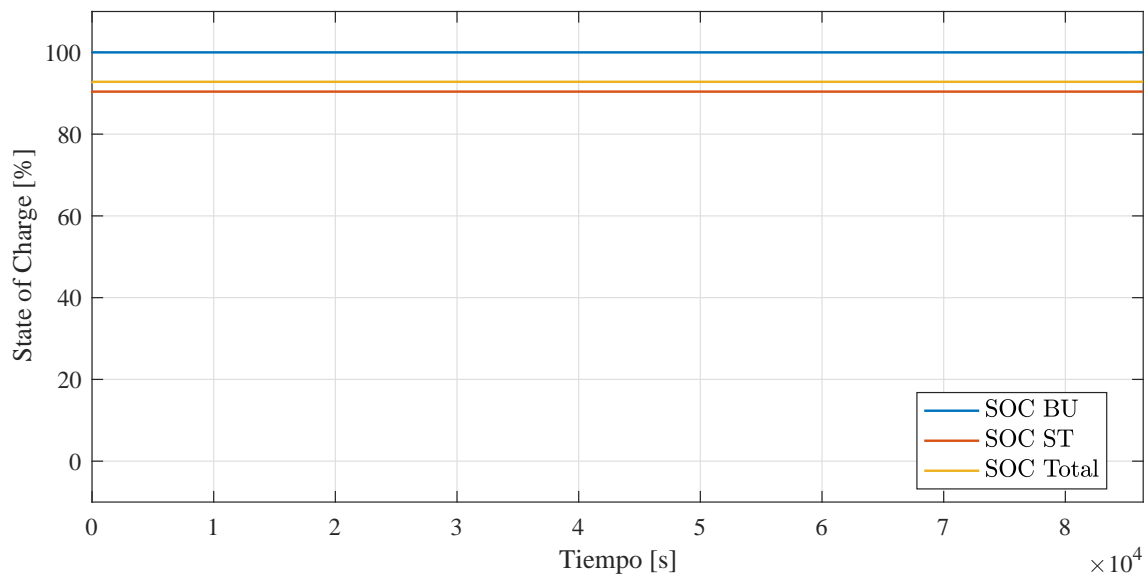
#### D.1. CASO 2



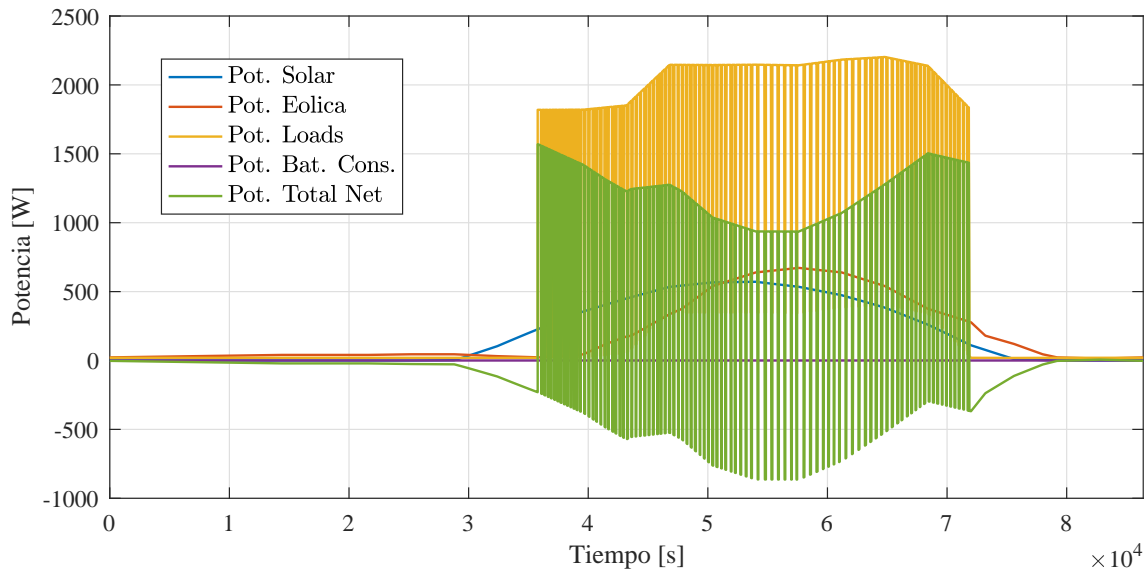
*Figura D.1: Flujo de potencia 13/02/2018 CASO 2 App Meteorológica.*



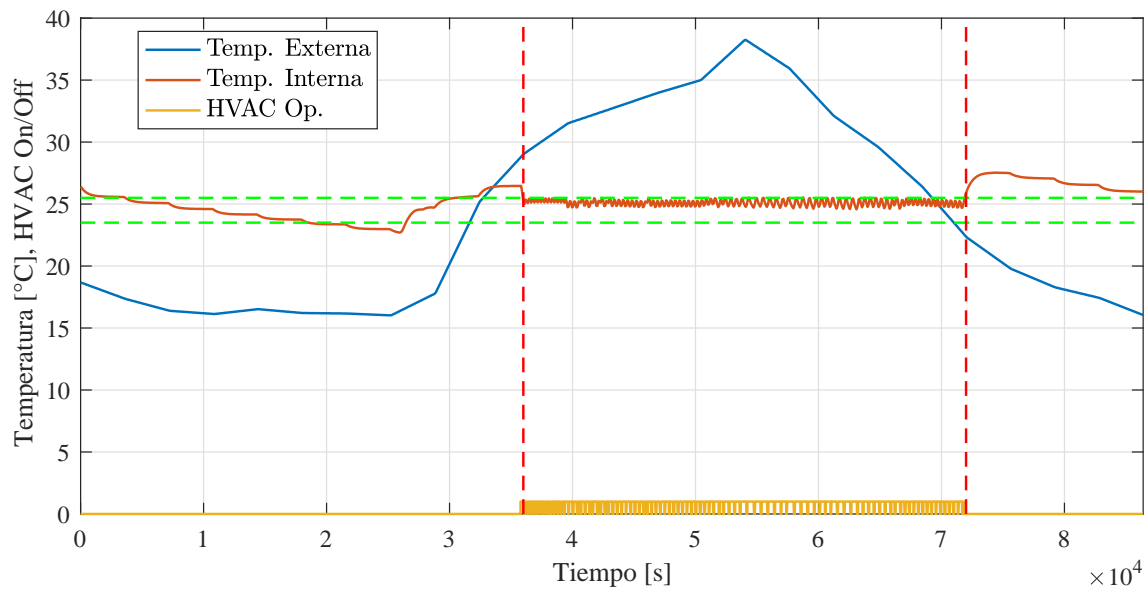
**Figura D.2:** Comportamiento de temperaturas y uso de sistema HVAC 13/02/2018 CASO 2 App Meteorológica.



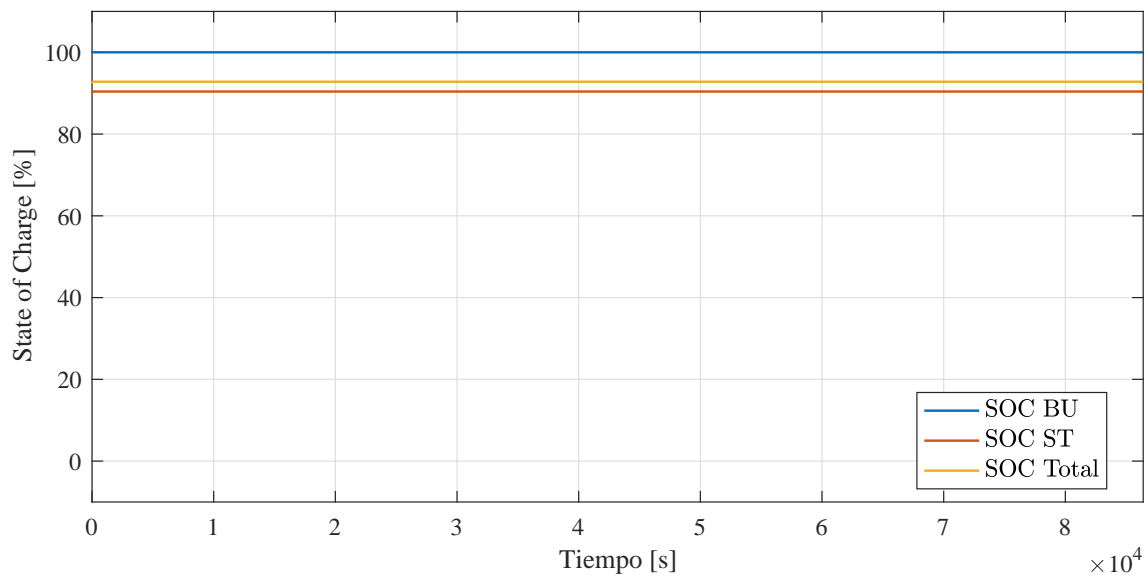
**Figura D.3:** Estado de carga del ESS 13/02/2018 CASO 2 App Meteorológica.



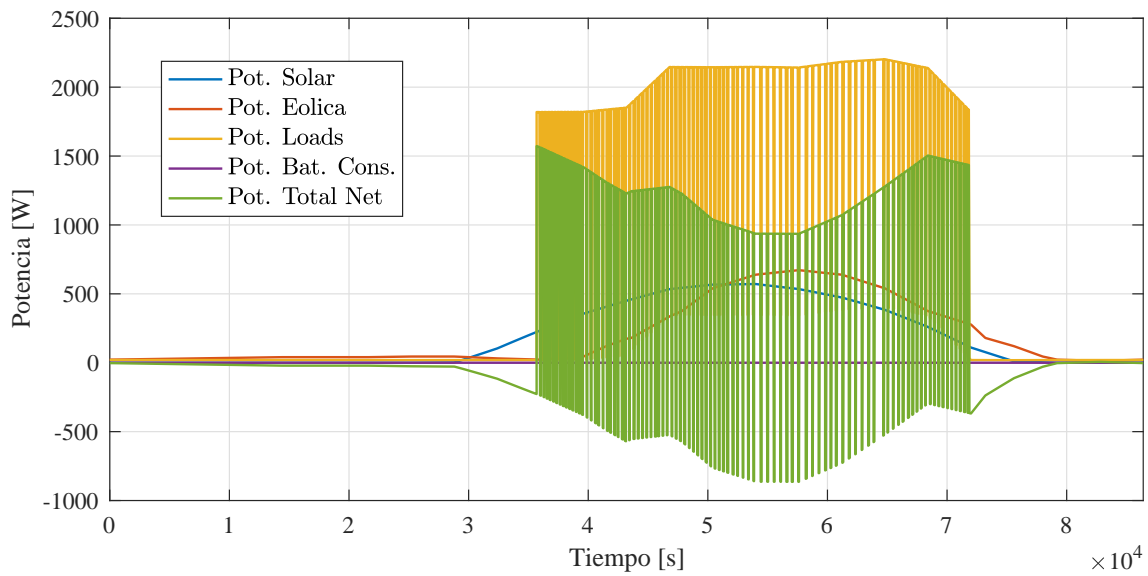
**Figura D.4:** Flujo de potencia 13/02/2018 CASO 2 Base de Datos.

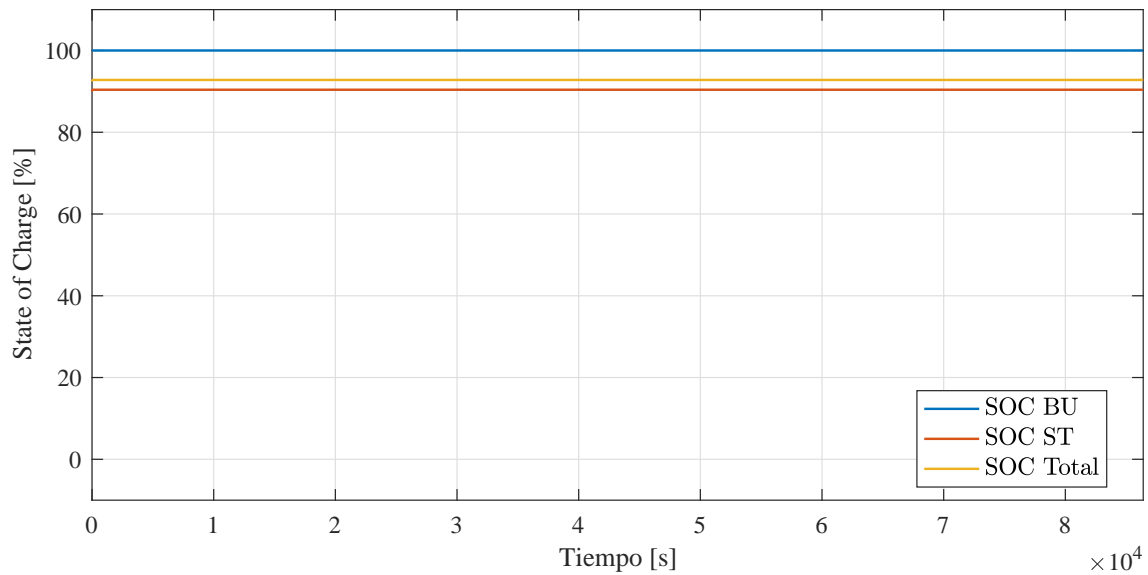


**Figura D.5:** Comportamiento de temperaturas y uso de sistema HVAC 13/02/2018 CASO 2 Base de Datos.

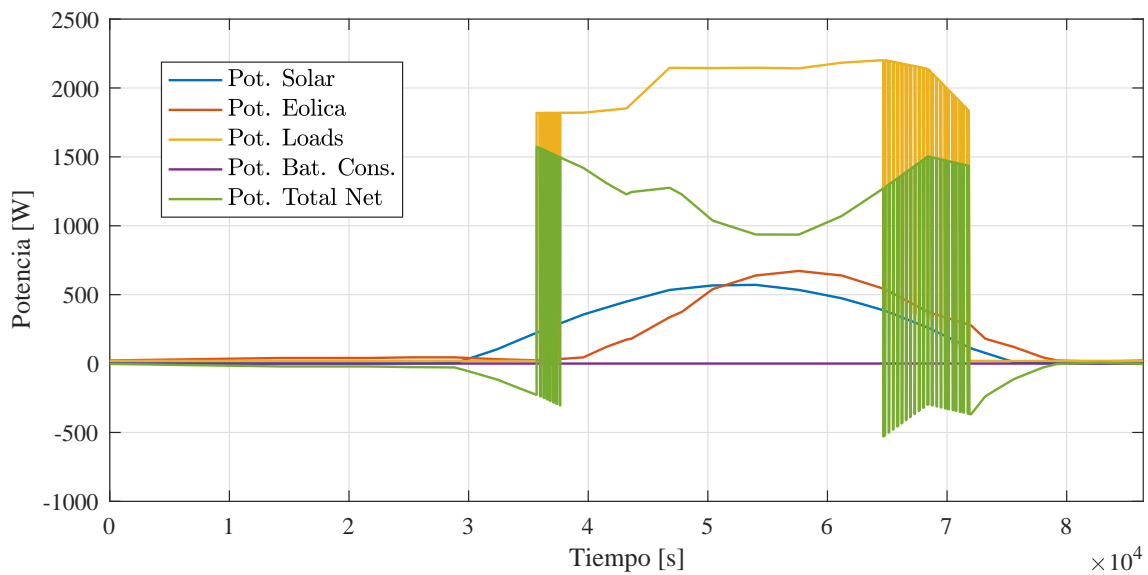


## D.2. CASO 3

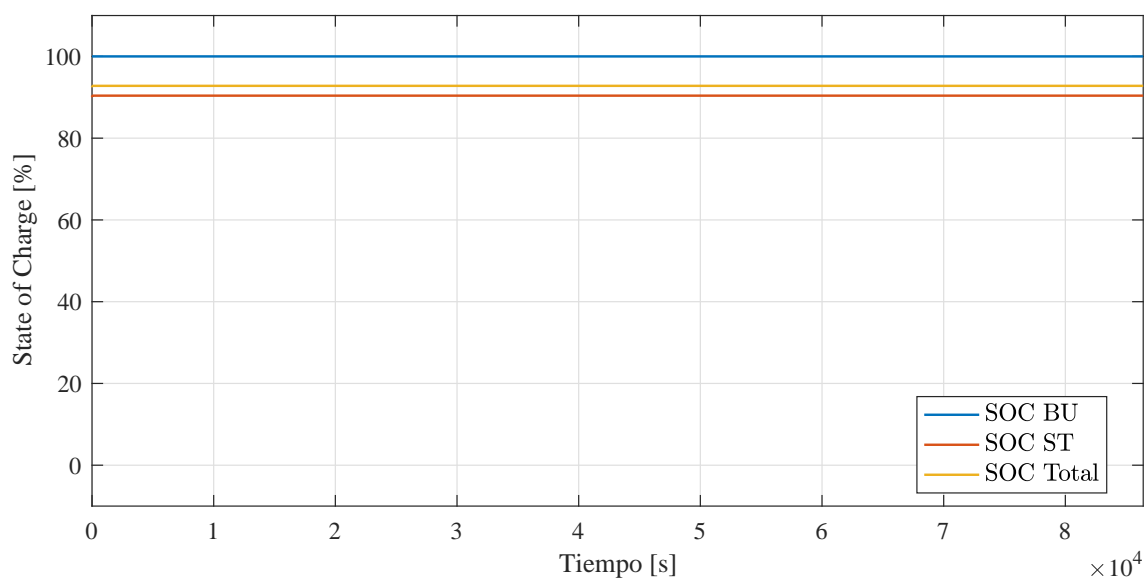




**Figura D.8:** Estado de carga del ESS 13/02/2018 CASO 3 exigiendo temperatura 24,5 °C.



**Figura D.9:** Flujo de potencia 13/02/2018 CASO 3 exigiendo temperatura 24,2 °C.



**Figura D.10:** Estado de carga del ESS 13/02/2018 CASO 3 exigiendo temperatura 24,2 °C.



# Bibliografía

- [1] Ministerio de Energía, *Ley Número 20.571: Regula el pago de las tarifas eléctricas de las generadoras residenciales*, 2014.
- [2] Ministerio de Energía, *Ley Número 21.118: Modifica la ley general de servicios eléctricos, con el fin de incentivar el desarrollo de las generadoras residenciales*, 2018.
- [3] *Boletín Sector Generación Enero 2018*, Generadoras de Chile, pp. 9-10, 2018.
- [4] Bruce Nordman, Ken Christensen, Alan Meier. *Think Globally, Distribute Power Locally: The Promise of Nanogrids*, IEEE Computer Society, 2012.
- [5] Fernando Y., Antonio S., Aldo B., Felisa C., Sarat K. *Engineering Sustainable Energy Systems: How Reactive and Predictive Homeostatic Control Can Prepare Electric Power Systems for Environmental Challenges*, Information Technology and Quantitative Management, 2017.
- [6] ANSI/ASHRAE Standard 55. *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*, ASHRAE, pp. 16-23, 2017.
- [7] Joshua Tosso, *Gestión del flujo de energía de un conjunto de clientes con generación distribuida mediante el uso de un control supervisor que considere un sistema de almacenamiento energético*, IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID, VOL. 5, NO. 4, pp. 1-8, JULY 2014.
- [8] Claudio A., Rodrigo Palma, *Trends in Microgrid Control*, Universidad Técnica Federico Santa María, 2017.
- [9] Farid K., Reza I., Nikos H., Aris D., *Microgrids Managment: Controls and Operation Aspects of Microgrids*, IEEE power & energy magazine, pp. 54-65, 2008.
- [10] Daniel Burmester, Ramesh Rayudu, Winston K.G. Seah, *Distributed Generation Nanogrid Load Control System*, Victoria University of Wellington, 2015.
- [11] J. P. Lopes, N. Hatziargyriou, J. Mutale, P. Djapic y N. Jenkins, *Integrating distributed generation into electric power systems: A review of drivers, challenges and opportunities*, Electric Power Systems Research, vol. 77, No 9, pp. 1189-1203, 2007.
- [12] Constanza Ahumada, *Diseño de Estrategias de Control Predictivas para Microrredes Mediante Curvas de Estatismo*, Memoria, Universidad de Chile, pp. 13-15, 2014.
- [13] R.K Boel, D. De Schutter, G. Nijse, J.M. Schumacher y J.H. van Schuppen, *Approaches to modelling, analysis, and control of hybrid systems*, Journal A, vol. 40, no 4, 1999.

- [14] Y. A.-R. I. Mohamed y E. F. El-Saadany, *Adaptive decentralized droop controller to preserve power sharing stability of paralleled inverters in distributed generation micro-grids*, IEEE Transactions on power electronics, vol. 23, no 6, 2008
- [15] Raúl Obrecht Ihl. *Caracterización del consumo energético residencial en la región metropolitana y análisis de escenarios de eficiencia energética*, Memoria, Universidad de Chile, pp. 2, 2016.
- [16] Álvaro Valenzuela, *Simulación térmica integrada de una habitación calefaccionada con un sistema de alimentación híbrido*, Memoria, Universidad Técnica Federico Santa María, Septiembre 2018.
- [17] Nelson Fumo, *A review on the basics of building energy estimation*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, pp. 31:53-60, 2014.
- [18] 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, pp. 13:1819-1835, 2009.
- [19] 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, pp. 11(5):998-1007, 2007.
- [20] ASHRAE Handbook, *Fundamentals*, American society of heating, refrigerating and air-conditioning engineers, inc., Atlanta, GA, USA, 2009.
- [21] Hai-xiang Zhao and Frédéric Magoulés, *A review on the prediction of building energy consumption*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(6):3586-3592, 2012.
- [22] Residential Energy Services Network, *Procedures for Verification of RESNET Accredited HERS Software Tools*, 2006.
- [23] Oleg Zikanov, *Essential computational fluid dynamics*, John Wiley & Sons, 2010.
- [24] Aurélie Fouquier, Sylvain Robert, Frédéric Suard, Louis Stéphane, 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.
- [25] Sanford A Klein, *Trnsys-a transient system simulation program*. University of Wisconsin-Madison, Engineering Experiment Station Report, pp. 38-12, 1988.
- [26] 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, Elsevier, 31(3):207-214, 1996.
- [27] F. Yanine , A. Sanchez , A. Barrueto , J. Tosso , F. M. Cordova and H. Rother, *Engineering Sustainability in Energy Systems: How Reactive and Predictive Homeostatic Control can Prepare Electric Power Systems for Environmental Challenges*, Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016.
- [28] F. Yanine, *Homeostatic Control of renewable micro-generation power systems: Towards a new approach to sustainable energy systems linked to energy efficiency*, Tesis, Pontificia Universidad Católica de Chile, Marzo 2014.

- [29] Ministerio de Energía, Gobierno de Chile, Facultad de Cs. Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Explorador Solar. Accedido en 2017, <http://www.minenergia.cl/exploradorsolar/>.
- [30] 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.
- [31] James D., Jacob N., Orna K., Minneapolis, Minnesota, EE. UU., Cedar Lake Ventures, Inc. Accedido en 2018, <https://es.weatherspark.com/>.
- [32] Rosa María Fernández Cantí, *MATLAB. Fundamentos y/o Aplicaciones*, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación de Barcelona, 2011.
- [33] Granda-Gutiérrez, E. E., Orta-Salomón, O. A., Díaz-Guillén, J. C., Jimenez, M. A., Osorio, M., & González, M. A. (2013). *Modelado y Simulación de Celdas y Paneles Solares*. Congreso Internacional de Ingeniería Electrónica 2013. 17-22. doi: <http://doi.org/10.13140/2.1.4192.8968>
- [34] Tsai, H., Tu, C., & Su, Y. (2008). *Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB / SIMULINK*, In Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2008 WCECS, 6. San Francisco, USA.
- [35] A. Khamis, A. Mohamed, H. Shareef, A. Ayob, M. Mohd, *Modelling and Simulation of a Single Phase Grid Connected Using Photovoltaic and Battery Based Power Generation*, 2013 European Modelling Symposium, DOI: 10.1109/EMS.2013.66, 20-22 Nov. 2013.
- [36] Empresa Electroimpulso, *Carga de Baterías*, Manual, 2018.
- [37] Enel Distribución Chile, Tarifas, <https://www.eneldistribucion.cl/tarifas>.
- [38] Richard Velásquez, *Estudio, Diseño y Construcción de un Prototipo de Generador Eólico para el Sector Costero de la XIV Región, en Corral*, Tesis, Universidad Austral de Chile, pp. 48-60, 2010.
- [39] Hussein H., Laurent M., Hassen B., *Effect of thermal inertia (time lag and decrement factor) on the insulation thermal capacity*, 2018 International Conference on Advances in Sustainable Engineering and Applications (ICASEA).
- [40] Peter Radecki and Brandon Hency, *Online Model Estimation for Predictive Thermal Control of Buildings*, IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY, VOL. 25, NO. 4, JULY 2017.