UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

SANTIAGO – CHILE



"MODELAMIENTO COMPUTACIONAL DEL COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO DE UNA OFICINA CON SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA"

YOHAN FELIPE CERDA ARANCIBIA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO, MENCIÓN ENERGÍA

PROFESOR GUÍA: DR. MAURICIO OSSES ALVARADO
PROFESOR CO-REFERENTE: DR. RODRIGO BARRAZA VICENCIO

OCTUBRE – 2026

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): [×]Memoria o trabajo de título [ ]Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Modelamiento computacional del comportamiento energético de una oficina con sistema de climatización y almacenamiento de energía térmica.

Nombre del candidato(a): Yohan Felipe Cerda Arancibia

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Mecánica

Campus: Santiago, San Joaquín. **Departamento:** Ingeniería Mecánica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Mauricio Osses Alvarado, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

[×]El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

[ ]El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por **(marcar una opción)**:

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 28/10/2026 **Firma:** 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 28/10/2026 **Firma:** 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

A quienes han estado ahí a través de los años, con su presencia, amistad y cariño.

A mis abuelas —mi Nenita (†), a quien le debo todo—, por su regalo de amor y ejemplo de vida;
a mis padres, por el apoyo incondicional;
a mi hermano, tíos y primos, por la cercanía sincera de siempre.

Y de manera muy especial a ti, Valita, por sostenerme, apoyarme y creer, incluso cuando yo dudaba.

Este logro también es de ustedes.

Agradecimientos

Quisiera expresar mi sincero agradecimiento al profesor Rodrigo Barraza por su constante disposición y ayuda a lo largo de este extendido camino; su apoyo ha sido fundamental.

Asimismo, agradezco profundamente a David Zaharia por la confianza depositada al brindarme la oportunidad de compatibilizar mis desafíos profesionales con este logro académico.

Finalmente, extiendo mi gratitud a César Díaz, Felipe Marchant, Felipe Meza, Sebastián Miño y al profesor Mauricio Osses, a todos ellos por su valiosa disposición y el respaldo brindado en las gestiones necesarias para la culminación exitosa de este proceso.

Resumen

El presente trabajo de título aborda el estudio y modelamiento computacional del comportamiento energético de una oficina ubicada en el edificio del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica Federico Santa María (Campus San Joaquín). El objetivo principal es desarrollar y validar un modelo térmico que permita evaluar la implementación de un sistema de climatización híbrido que integre Almacenamiento de Energía Térmica (TES).

La metodología contempló una campaña de monitoreo *in situ* de variables higrotérmicas durante el periodo estival, permitiendo caracterizar la respuesta dinámica del inmueble. Se desarrolló un modelo multizona en el software TRNSYS 17 calibrado manualmente y, posteriormente, validado mediante un coeficiente de determinación (R^2) —para la Oficina Principal— de 0,965 en temperatura y 0,630 en humedad relativa, confirmando su aptitud para la simulación energética.

Las simulaciones de la estrategia propuesta demostraron que es posible garantizar el confort higrotérmico en un día crítico de alta carga solar, desplazando el 57% del consumo energético total hacia el horario nocturno (valle). Si bien la incorporación de almacenamiento y auxiliares implicó un Factor de Desempeño Estacional (SPF) de 1,56 —inferior a la generación directa—, el sistema logra un beneficio estratégico superior: reducir la potencia eléctrica demandada en hora punta en más de un 60% (*peak shaving*), aplanando la curva de demanda y aliviando la red eléctrica.

Palabras clave: Modelamiento Térmico de Edificios, TRNSYS, HVAC, Almacenamiento de Energía Térmica (TES), DSM, Eficiencia Energética.

Abstract

This thesis addresses the study and computational modeling of the energy behavior of an office located in the Mechanical Engineering Department building at Universidad Técnica Federico Santa María (San Joaquín Campus). The main objective is to develop and validate a thermal model to evaluate the implementation of a hybrid HVAC system incorporating Thermal Energy Storage (TES).

The methodology included an *in situ* monitoring campaign of hygrothermal variables during the summer period, allowing the building's dynamic response to be characterized. A multizone model was developed in TRNSYS 17, manually calibrated and subsequently validated through a coefficient of determination (R^2) —for the Main Office— of 0.965 for temperature and 0.630 for relative humidity, confirming its suitability for energy simulation.

Simulations of the proposed strategy showed that hygrothermal comfort can be guaranteed on a critical high solar load day, shifting 57% of total energy consumption to the night-time off-peak period. Although incorporating storage and auxiliary equipment resulted in a Seasonal Performance Factor (SPF) of 1.56 —lower than direct generation—, the system achieves a greater strategic benefit: shaving peak electrical power demand by more than 60%, flattening the demand curve and easing the load on the electrical grid.

Keywords: Building Thermal Modeling, TRNSYS, HVAC, Thermal Energy Storage (TES), DSM, Energy Efficiency.

Nomenclatura

$\dot{Q}$	[W]	Tasa de transferencia de calor.
$\dot{Q}_{\text{air}}$	[W]	Ganancia neta de calor hacia la zona o nodo de aire.
$\dot{Q}_{\text{inf}}$	[W]	Ganancia sensible por infiltración de aire exterior.
$\dot{Q}_{\text{surf}}$	[W]	Ganancia convectiva neta proveniente de todas las superficies interiores que delimitan la zona.
$\dot{Q}_{\text{vent}}$	[W]	Ganancia sensible por ventilación mecánica o natural proveniente de un sistema de aire.
$\dot{Q}_{\text{g,c}}$	[W]	Ganancias internas convectivas (personas, equipos, iluminación).
$\dot{Q}_{\text{cplg}}$	[W]	Ganancias de acoplamiento de aire (*coupling*) provenientes de zonas adyacentes.
$\dot{Q}_{\text{ISHCC}}$	[W]	Radiación solar absorbida por dispositivos de sombreado interno que se transfiere por convección al aire de la zona.
$\dot{Q}_{\text{solar}}$	[W]	Fracción de la radiación solar que ingresa por ventanas externas y se transfiere inmediatamente como calor convectivo al nodo de aire.
G_{solar}	[W/m^2]	Constante solar del límite superior de la atmósfera.
G_T	[W/m^2]	Radiación solar total sobre superficie horizontal terrestre.
G_D	[W/m^2]	Radiación solar directa sobre superficie horizontal.
$G_{D,n}$	[W/m^2]	Radiación solar directa normal (en seguimiento).
G_d	[W/m^2]	Radiación solar difusa sobre superficie horizontal.

$G_{T,S}$	$[W/m^2]$	Radiación solar total sobre superficie inclinada.
$G_{D,S}$	$[W/m^2]$	Radiación solar directa sobre superficie inclinada.
$G_{d,S}$	$[W/m^2]$	Radiación solar difusa sobre superficie inclinada.
$G_{g,S}$	$[W/m^2]$	Radiación solar reflejada por el suelo sobre superficie inclinada.
$S_{s,i}$	$[W/m^2]$	Radiación total absorbida por superficie interior.
$S_{s,o}$	$[W/m^2]$	Radiación solar absorbida por la superficie exterior.
$\dot{q}_{r,s,i}$	$[W/m^2]$	Transf. de calor radiante con las demás superficies en la zona.
$\dot{q}_{r,s,o}$	$[W/m^2]$	Transf. de calor radiante con superficies exteriores.
$\dot{q}_{w,g,i}$	$[W/m^2]$	Flujo de calor radiante desde cargas internas a la superficie
$\dot{q}_{s,i}$	$[W/m^2]$	Conducción de calor desde el cerramiento a superficie interior
$\dot{q}_{s,o}$	$[W/m^2]$	Conducción de calor desde la superficie exterior al cerramiento.
$\dot{q}_{c,s,i}$	$[W/m^2]$	Flujo de calor por convección desde la superficie interior.
$\dot{q}_{c,s,o}$	$[W/m^2]$	Flujo de calor convectivo a la superficie exterior desde condición de borde o ambiente exterior.
U	$[W/m^2K]$	Transmitancia térmica.
h	$[W/m^2K]$	Coeficiente de convección.
k	$[W/mK]$	Conductividad térmica.
R	$[m^2K/W]$	Resistencia térmica.
c_p	$[kJ/kgK]$	Calor específico del aire.
$\dot{V}$	$[m^3/s]$	Flujo volumétrico de un fluido.
δ	$[m^2/s]$	Difusividad térmica.
g	$[m/s^2]$	Aceleración de gravedad en la Tierra.

ρ	$[\mathrm{kg/m^3}]$	Densidad de un fluido.
$\dot{m}$	$[\mathrm{kg/s}]$	Flujo másico.
ΔT	[K]	Diferencia de temperaturas.
T_{amb}	[K]	Temperatura seca del ambiente.
T_{sky}	[K]	Temperatura efectiva del cielo.
T_i	[K]	Temperatura del ambiente interior.
$T_{a,s}$	[K]	Temperatura del ambiente exterior.
$T_{s,i}$	[K]	Temperatura superficial interior.
$T_{s,o}$	[K]	Temperatura superficial exterior.
θ_z	[rad]	Ángulo cenital del Sol.
θ	[rad]	Ángulo de incidencia del Sol en una superficie.
β	[rad]	Ángulo entre el plano de una superficie y la horizontal.
P_o	[atm]	Presión atmosférica a nivel del mar.
ε	$[-]$	Emisividad de una superficie.
α	$[-]$	Absortividad de una superficie.
r	$[-]$	Reflectividad de una superficie.
τ	$[-]$	Transmitancia de una superficie.
α_s	$[-]$	Absortividad respecto de la radiación solar.
τ_s	$[-]$	Transmitancia respecto de la radiación solar.
F_{a_b}	$[-]$	Factor de visión de la superficie a hacia la b.
ω	$[-]$	Humedad específica.
$\varepsilon_{\mathrm{sky}}$	$[-]$	Claridad del cielo.
Δ	$[-]$	Brillo del cielo.
i_{atm}	$[-]$	Índice de masa relativa de atmósfera.

Índice General

Resumen ..... **i**
Abstract ..... **ii**
Nomenclatura ..... **iii**
Introducción ..... **xiv**
Motivación xv
Objetivos xvi
Estructura del documento xvii

CAPÍTULO 1
MARCO TEÓRICO **1**
1.1. Variables climáticas de interés 2
1.1.1. Temperatura atmosférica 2
1.1.2. Humedad relativa del aire 3
1.1.3. Viento 4
1.1.4. Radiación solar 4
1.2. Transferencia de calor en un edificio 6
1.2.1. Conducción 6
1.2.2. Convección 8
1.2.3. Infiltraciones y ventilación 10
1.2.4. Radiación térmica 11
1.2.5. Ganancias internas 19
1.2.6. Inercia térmica 21
1.3. Confort térmico 23
1.3.1. Parámetros ambientales 24
1.3.2. Parámetros individuales 25
1.3.3. Evaluación de la sensación térmica – Método Fanger 27
1.4. Climatización 31
1.4.1. Carga térmica 32
1.4.2. Sistemas activos 33
1.4.3. Estrategias pasivas 34
1.4.4. Eficiencia energética 35

1.5. Almacenamiento de energía térmica (TES) 37
1.5.1. Almacenamiento por calor sensible 38
1.5.2. Almacenamiento por calor latente 39
1.5.3. Almacenamiento en materiales termoquímicos..... 39
1.6. Simulación Energética de Edificios (BES) 40
1.6.1. Modelos de caja blanca (físicos) 42
1.6.2. Modelos de caja negra (estadísticos o *data-driven*) 44
1.6.3. Modelos híbridos (Caja Gris) 45
1.6.4. Métodos numéricos para cálculo de cargas térmicas 45
1.6.5. Calibración y validación de modelos 48

CAPÍTULO 2
ESTADO DEL ARTE 52

2.1. Panorama de herramientas BES/BEPS 52
2.2. Metodologías de Calibración y Validación de Softwares y Modelos ... 54
2.3. Almacenamiento de Energía Térmica (TES) para sistemas HVAC ... 57
2.4. HVAC+TES para Gestión de Demanda e integración en microrredes . 59

CAPÍTULO 3
MEDICIONES TÉRMICAS 63

3.1. Ubicación y características generales del inmueble 64
3.2. Metodología de medición higrotérmica 66
3.2.1. Calibración y precisión instrumental..... 67
3.2.2. Instalación de instrumentos 68
3.3. Condiciones ambientales..... 69
3.3.1. Estaciones de monitoreo 69
3.4. Datos obtenidos..... 70
3.4.1. Datos medidos 70
3.4.2. Datos meteorológicos 71

CAPÍTULO 4
MODELAMIENTO DEL EDIFICIO 73

4.1. Entorno y Fundamentos de Simulación — TRNSYS y el Type 56 .. 75

4.1.1. Fundamentos de cálculo del Type 56 76

4.2. Metodología de Modelamiento del Edificio 86

4.2.1. Modelo Geométrico 3D y Zonificación Térmica 86
4.2.2. Caracterización Termofísica de la Envolvente — TRNBuild 89
4.2.3. Entradas del módulo de cargas 95
4.2.4. Implementación y esquema modular: Simulation Studio.... 106

CAPÍTULO 5
CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO TÉRMICO . 108

5.1. Análisis de sensibilidad 109

5.1.1. Metodología del SA 109
5.1.2. Resumen de resultados 112

5.2. Metodología de calibración y validación 115

5.2.1. Métricas de error 115
5.2.2. Ventanas de evaluación 118
5.2.3. Procedimiento de calibración 118

5.3. Resultados del ajuste 120

5.3.1. Calibración del modelo de edificio 120
5.3.2. Validación de la Oficina Principal 123

CAPÍTULO 6
CASO DE APLICACIÓN: OFICINA CON SISTEMA HVAC + TES .. 125

6.1. Metodología de dimensionamiento del sistema 126

6.1.1. Criterios de diseño y demanda máxima 127
6.1.2. Dimensionamiento del HVAC + TES 128

6.2. Implementación del sistema en TRNSYS 132

6.2.1. Descripción de componentes y circuito 133
6.2.2. Estrategia de control 135
6.2.3. Supuestos de modelación y de cálculo comparativo 136

CAPÍTULO 7
RESULTADOS Y ANÁLISIS 137

7.1. Validación del modelo térmico 137

7.1.1. Ajuste higrotérmico del modelo calibrado – Of. Principal . 137
7.1.2. Análisis de fuentes de incertidumbre 139

7.2. Caracterización del comportamiento energético pasivo del edificio 140

7.2.1. Distribución de T° en condición de alto estrés térmico 140
7.2.2. Perfil térmico del modelo pasivo con ocupación 141

7.3. Desempeño del sistema HVAC+TES 144

7.3.1. Control del confort higrotérmico 144
7.3.2. Dinámica Operacional del Sistema TES 146

7.4. Análisis energético y eficiencia 148

7.4.1. Desplazamiento y Recorte de Carga Eléctrica 148
7.4.2. Balance Global y Eficiencia (SPF) 151

CAPÍTULO 8
CONCLUSIONES 154

8.1. Conclusiones Generales 154

8.2. Conclusiones Específicas 155

8.3. Proyecciones y Trabajos Futuros 156

REFERENCIAS 158

ANEXOS 164

Anexo A: Ecuación de Confort de Fanger 164

Anexo B: Planos de Edificio Ingeniería Mecánica 166

Anexo C: Detalle Capa por Capa de los Cerramientos Opacos 168

Anexo D: Coef. Empíricos del Modelo de Radiación Difusa de Pérez et al. 170

Anexo E: Resultados detallados del análisis de sensibilidad por zonas .. 171

Índice de Figuras

Figura 1.1 Intercambio de radiación entre dos superficies. Fuente: Çengel & Ghajar [8]. 14
Figura 1.2 Intercambio de calor por radiación entre una superficie y las superficies que la rodean. Fuente: Çengel & Ghajar [8]. 15
Figura 1.3 Efecto de la inercia térmica: Amortiguamiento de la amplitud térmica y desfase temporal. Fuente: Elaboración propia. 22
Figura 1.4 Relación entre PPD y PMV (Fuente: Elaboración propia basado en ISO 7730:2005 [10]) 30
Figura 1.5 Factores que configuran el desempeño térmico de edificios (Fuente: Elaboración propia basado en Sarabia, 2010 [14]) 41
Figura 3.1 Ubicación del edificio (Fuente: Google maps) 64
Figura 3.2 Vistas de edificio de Ingeniería Mecánica 65
Figura 3.3 Registradores Tinytag de T° y HR, respectivamente 66
Figura 3.4 Caseta con registradores - segunda oficina 68
Figura 3.5 Gráfico de temperaturas registradas (media horaria) 70
Figura 3.6 Gráfico de humedades relativas (media horaria) 71
Figura 3.7 Gráfico de temperatura seca del ambiente. 71
Figura 3.8 Gráfico de humedad relativa del ambiente. (Fuente: Registro USACH [47]) 72
Figura 3.9 Gráfico de Radiación solar global horizontal (medida) y directa normal (derivada) - Fuente: estación Cerro Calán, DAS [48] 72
Figura 4.1 Simulación dinámica de edificios en TRNSYS (Fuente: Manual TRNSYS, Vol.5 [52]) 74
Figura 4.2 Balance de calor sobre nodo de aire (Fuente: Manual TRNSYS, Vol.5 [52]) 76

Figura 4.3 Flujos de calor y temperaturas de superficies (Fuente: Manual TRNSYS, Vol.5 [52]) 77
Figura 4.4 Modelos de radiación de onda larga; zona con tres superficies (Fuente: Manual TRNSYS, Vol.5 [52]) 83
Figura 4.5 Modelo 3D – Google SketchUp (Fuente: Elaboración propia) 87
Figura 4.6 Zonas térmicas - TRNBuild 88
Figura 4.7 Modelo térmico del edificio en TRNSYS – Simulation Studio (Fuente: Elaboración propia) 106
Figura 5.1 Resultados del SA sobre HR (triángulos rojos) y T° (cuadrados azules) en 'HAB_MODELO' 113
Figura 5.2 Resultados del SA sobre HR (triángulos rojos) y T° (cuadrados azules) en 5 zonas térmicas 114
Figura 5.3 Diagramas de dispersión Medido (eje x) vs. Simulado (eje y) con la recta de identidad 1:1. T° a la izquierda y HR a la derecha..... 122
Figura 5.4 Diagramas de dispersión Medido (eje x) vs. Simulado (eje y), ventana de validación. T° a la izquierda y HR a la derecha..... 123
Figura 6.1 Esquema conceptual del sistema de almacenamiento y distribución de energía térmica. Fuente: Elaboración propia. 125
Figura 6.2 Demanda por climatización (equipo ideal) durante jornada de mayor consumo 128
Figura 6.3 Modelamiento Energético en TRNSYS de la Oficina Principal, integrando Sistema de Climatización y TES – Simulation Studio..... 133
Figura 7.1 Validación del modelo higrotérmico: comparación de datos medidos (naranja) vs. simulados (azul) en la Oficina Principal 138
Figura 7.2 Distribución espacial de temperaturas en el modelo de edificio simulado durante horario de máxima carga – 30 de enero 2017. 140

Figura 7.3 Flujos de calor hacia la Oficina Principal por componente durante un día de verano – modelo pasivo con ocupación..... 142
Figura 7.4 Situación de confort térmico en horario laboral – (10 días hábiles). Comparación entre modelo con HVAC+TES vs. modelo pasivo..... 145
Figura 7.5 Perfiles de temperatura: oficina principal (línea azul), tanque de almacenamiento (línea roja) – y ciclos de actividad: franjas anaranjadas (Carga – Bomba de Calor) y azules (Descarga – *Fan-Coil*)..... 146
Figura 7.6 Desplazamiento de Carga Eléctrica – día crítico de diseño..... 149
Figura B.1 Planta Arquitectónica Nivel 0. Zona del Laboratorio de Tecnología Mecánica. – Sin Escala..... 166
Figura B.2 Planta Arquitectónica Nivel 1. Detalle del sector de oficinas. – Sin Escala..... 167
Figura B.3 Planta Arquitectónica Nivel 2. Sala de Proyectos – Sin Escala 167
Figura E.1 Resultados del SA sobre HR (triángulos rojos) y T° (cuadrados azules) en 'PASILLO.....172
Figura E.2 Resultados del SA sobre HR (triángulos rojos) y T° (cuadrados azules) en 'HAB_LAT1'.....172
Figura E.3 Resultados del SA sobre HR (triángulos rojos) y T° (cuadrados azules) en 'ENTRE_PISO'.....173
Figura E.4 Resultados del SA sobre HR (triángulos rojos) y T° (cuadrados azules) en 'LAB_MEC'.....173

Índice de Tablas

Tabla 1.1 Escala de sensación térmica de Fanger. Fuente: ISO 7730 [10]. 27
Tabla 1.2 Valores de PMV para actividad de oficina (1,2 [met]) y humedad relativa del 50%. Fuente: Adaptado de UNE-EN ISO 7730:2005 [10]. 28
Tabla 1.3 Objetivos funcionales de un sistema de climatización [5]. 31
Tabla 4.1 Tipos de cerramientos opacos elaborados en TRNBuild.....90
Tabla 4.2 Propiedades superficiales de los materiales utilizados 91
Tabla 4.3 Coeficientes de transferencia de calor por convección aplicados....92
Tabla 4.4 Características de cerramientos acristalados 92
Tabla 4.5 Tasas de infiltración usadas en el modelo 94
Tabla 4.6 Ganancias internas consideradas.....95
Tabla 4.7 Inputs principales del Type 56 96
Tabla 4.8 Inputs adicionales para geometría 3D 97
Tabla 4.9 Parámetros de entrada del Type 77 101
Tabla 5.1 Parámetros constructivos para SA 110
Tabla 5.2 Otros parámetros para SA 111
Tabla 5.3 Variación del tipo de acristalado para SA.....111
Tabla 5.4 Influencia del tipo de acristalado doble sobre las métricas de error 120
Tabla 5.5 Resultado de calibración por zonas térmicas.....121
Tabla 5.6 Ajuste (RMSE, R^2) en la ventana de calibración – Oficina Principal122
Tabla 5.7 Ajuste (RMSE, R^2) en la ventana de validación – Oficina Principal.123
Tabla 6.1 Supuestos de simulación aplicados. 136
Tabla 7.1 Flujos de calor hacia la Oficina Principal durante un día de verano. 142
Tabla 7.2 Distribución del consumo energético del sistema durante el día crítico150
Tabla 7.3 Balance de Energía y Rendimiento del Sistema (300 hrs.) 151
Tabla C.1 Detalle capa por capa de los cerramientos opacos.....168
Tabla D.1 Coeficientes de brillo reducido para el modelo de Pérez et al. (1999) .170

Introducción

En un escenario de crecimiento sostenido de la demanda energética global [1], la optimización del consumo y el control de emisiones de CO_2 se han convertido en un imperativo urgente. En este desafío, el sector de la edificación desempeña un papel estratégico. En Chile, la climatización residencial representa cerca del 8% del consumo nacional de energía final, llegando a superar el 50% del gasto energético total de los hogares [2], [3]. Esta realidad posiciona al análisis energético de edificios como una disciplina fundamental para desarrollar soluciones que concilien el confort térmico con la eficiencia económica y ambiental, entre las cuales destacan la gestión de la demanda (*Demand Side Management*, DSM) y el almacenamiento de energía térmica (*Thermal Energy Storage*, TES).

El presente trabajo aporta al desarrollo de estas estrategias mediante la construcción de un modelo térmico-energético de un recinto de oficinas, calibrado y validado empíricamente a partir de una campaña de monitoreo higrotérmico *in situ*. Dicha medición se ejecutó en una de las oficinas bajo régimen de oscilación libre (*free-floating*), permitiendo ajustar el modelo directamente sobre las variables de estado de interés (temperatura y humedad del aire), en contraste con el enfoque habitual de ajuste sobre variables de consumo energético.

Esta base metodológica constituye una plataforma robusta para cuantificar el impacto de estrategias DSM y TES sobre el comportamiento térmico, la eficiencia global y el perfil de carga eléctrica del edificio, contribuyendo al diseño de sistemas de climatización inteligentes e integrados a la gestión energética.

Motivación

La creciente conciencia sobre la relación entre la actividad antropogénica y el cambio climático ha llevado a las naciones a firmar acuerdos internacionales para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Estos compromisos se centran en dos ejes principales: la sustitución de combustibles fósiles por fuentes renovables y la mejora de la eficiencia energética en los sectores de consumo. Este marco ha impulsado un desarrollo tecnológico acelerado, logrando una notable reducción de los costos de generación a partir de fuentes renovables [1].

A nivel local, el Plan de Política Energética Nacional (PEN 2050) establece metas ambiciosas para la matriz chilena, proyectando que al año 2030 el 80% de la generación eléctrica provenga de energías renovables, con el objetivo final de alcanzar una matriz 100% libre de emisiones para el año 2050 [4]. Lograr esta mayor penetración de las Energías Renovables No Convencionales (ERNC) dependerá, en gran medida, de gestionar eficazmente su variabilidad intrínseca, lo que exige avanzar hacia una gestión flexible de la demanda en el usuario final [1], [4].

En este marco, el almacenamiento de energía térmica (TES) se posiciona como un facilitador clave de la gestión de la demanda (DSM). El TES permite desacoplar temporalmente la producción del consumo de energía térmica, posibilitando el desplazamiento de la carga eléctrica asociada (*load shifting*) y el recorte de máximos de potencia (*peak shaving*). Dado que la climatización concentra una fracción relevante del consumo energético en edificios, este sector constituye un escenario especialmente propicio para implementar y analizar este tipo de soluciones tecnológicas, fundamentando así la motivación central de esta investigación.

Objetivos

Objetivo General

Desarrollar un modelo computacional validado del comportamiento térmico-energético de una oficina en el edificio de Ingeniería Mecánica del Campus San Joaquín (UTFSM), que permita la evaluación operativa de un sistema de climatización activa acoplado a Almacenamiento de Energía Térmica (TES).

Objetivos Específicos

- Caracterizar la respuesta higrotérmica basal del recinto en régimen pasivo y sus condiciones de borde, mediante el levantamiento empírico de variables ambientales (temperatura y humedad) y la recopilación de datos climatológicos locales.
- Construir un modelo computacional multizona de simulación dinámica del edificio en el entorno TRNSYS.
- Calibrar el modelo térmico contrastando sus resultados frente a los datos empíricos monitoreados, garantizando que los indicadores de error estadístico validen su aptitud predictiva.
- Proponer una estrategia de integración y control para un sistema de climatización con Almacenamiento de Energía Térmica (TES) aplicable a una oficina bajo perfiles de ocupación establecidos.
- Evaluar el desempeño energético y el impacto operativo de la estrategia propuesta frente a escenarios representativos de carga térmica, cuantificando la eficiencia global del sistema y el desplazamiento de la demanda.

Estructura del documento

Para alcanzar los objetivos descritos, esta memoria de título se organiza siguiendo una progresión lógica desde las bases conceptuales hasta su aplicación práctica, estructurando sus capítulos de la siguiente manera:

- **Marco Teórico**: establece los fundamentos de transferencia de calor, confort térmico, almacenamiento de energía térmica (TES) y simulación energética de edificios (BES).
- **Estado del Arte**: revisa el panorama de herramientas de simulación, metodologías de calibración/validación y gestión de demanda con TES, posicionando este trabajo respecto a la literatura.
- **Mediciones Térmicas**: caracteriza empíricamente la respuesta pasiva del edificio mediante monitoreo *in situ* y datos climáticos locales.
- **Modelamiento del Edificio**: describe la construcción y parametrización del modelo computacional en TRNSYS.
- **Calibración y Validación del Modelo**: detalla el ajuste del modelo base a partir de los datos empíricos medidos.
- **Caso de aplicación (oficina con sistema HVAC + TES)**: diseña e implementa la estrategia de climatización sobre el modelo del edificio ya calibrado.
- **Resultados y Análisis**: consolida y discute la validación del modelo térmico y el desempeño energético y operativo del sistema HVAC+TES propuesto.
- **Conclusiones**: presenta la síntesis de los principales hallazgos, aportes metodológicos y proyecciones para trabajos futuros.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

Este capítulo establece las bases conceptuales que sustentan el desarrollo de este trabajo. Se organiza en seis ejes temáticos: variables climáticas de interés arquitectónico; principios de transferencia de calor en edificaciones; criterios de evaluación del confort higrotérmico; sistemas de climatización y eficiencia energética; almacenamiento térmico; y modelamiento energético de edificios.

El modelamiento energético de edificios (*Building Energy Simulation*, BES) busca predecir su comportamiento térmico, el cual resulta de la interacción dinámica entre tres grandes grupos de variables o categorías: las propiedades de la envolvente (geometría, materiales e inercia térmica), las cargas térmicas que la perturban y los sistemas activos que las compensan. Las cargas, a su vez, se clasifican según su origen, en externas e internas. Las primeras dependen del clima local —temperatura, radiación solar, viento— y de factores como la orientación y el sombreamiento del entorno. Las segundas derivan de la operación del espacio —calor metabólico de ocupantes y disipación de equipos electrónicos e iluminación— y se pueden representar mediante perfiles horarios que reflejan la variación de la ocupación y el uso de los sistemas [5].

En edificios de oficinas, el objetivo que guía el diseño y la operación es garantizar el confort de los ocupantes, entendido como un estado de bienestar fisiológico y psicológico que asegure su productividad y satisfacción. Alcanzar este objetivo

mediante sistemas de climatización implica, a su vez, un desafío de eficiencia energética: satisfacer la demanda térmica con el mínimo consumo de recursos que sea posible. Este desafío se extiende, además, a la gestión activa de la demanda. En este ámbito, el Almacenamiento de Energía Térmica (TES) permite, por ejemplo, desacoplar temporalmente la generación de frío o calor de su consumo efectivo, habilitando estrategias de desplazamiento de carga que complementan la eficiencia operativa de los sistemas de climatización.

1.1. Variables climáticas de interés

En ingeniería, se distingue el "tiempo atmosférico" (estado instantáneo de la atmósfera) del clima, definido como la estadística del comportamiento meteorológico a largo plazo [5]. Para el diseño bioclimático y el dimensionamiento de sistemas, el análisis se basa en la caracterización estadística de variables de mayor incidencia como la temperatura, radiación solar y humedad, desestimando eventos aislados para centrarse en patrones representativos.

1.1.1. Temperatura atmosférica

La temperatura (T°) es una magnitud escalar que representa la energía interna de un sistema termodinámico [6]; en este caso, del aire atmosférico. En términos de transferencia de calor, actúa como el potencial impulsor del flujo energético: el intercambio térmico entre un cuerpo y su entorno es directamente proporcional al gradiente de temperatura existente. Por ello, constituye una de las variables más influyentes en el balance térmico del edificio y en el confort de los ocupantes [5].

El estudio de sus oscilaciones cíclicas (diarias y estacionales) en el emplazamiento del edificio es fundamental, pues condiciona decisiones de diseño como la selección de materiales de envolvente, el dimensionamiento del aislamiento térmico, las estrategias de ventilación y la capacidad de los sistemas de climatización activa.

1.1.2. **Humedad relativa del aire**

Termodinámicamente, la humedad relativa (HR) se define como el cociente entre la presión parcial de vapor de agua en el aire y la presión de saturación a la misma temperatura [6]. En otras palabras, cuantifica el grado de saturación del aire, siendo inversamente dependiente de la temperatura.

Desde una perspectiva geográfica, los niveles de HR son más elevados en zonas costeras o lacustres —por la proximidad de masas de agua— y disminuyen significativamente en climas áridos o de altura.

En edificación, su control resulta determinante. Niveles altos, combinados con puentes térmicos o bajas temperaturas, aumentan el riesgo de condensación superficial o intersticial, lo que favorece la proliferación de moho y la degradación de materiales. Por el contrario, niveles excesivamente bajos ($< 30\%$) provocan sequedad en mucosas y problemas de electricidad estática, afectando negativamente la calidad ambiental interior y el confort de los ocupantes [5].

1.1.3. Viento

El viento es el movimiento de masas de aire generado por gradientes de presión atmosférica. Se trata de una magnitud vectorial, caracterizada por su velocidad y dirección, ambas variables en el tiempo. Sin embargo, mediante análisis de frecuencias direccionales es posible identificar patrones recurrentes o "vientos predominantes", que dependen de la orografía local y la estacionalidad [5].

En el estudio térmico de edificios, el viento juega un rol triple:

1. **Ventilación natural**: actúa como fuerza motriz para la renovación de aire por presión dinámica.
2. **Infiltraciones**: incide directamente en las tasas de ingreso no controlado de aire a través de rendijas de la envolvente.
3. **Transferencia de calor**: modifica el coeficiente de convección exterior (h), alterando el intercambio térmico en fachadas [5].

1.1.4. Radiación solar

La radiación solar se define como el flujo de energía electromagnética proveniente del Sol. Antes de interactuar con la atmósfera terrestre, la irradiancia promedio sobre una superficie perpendicular a los rayos solares se conoce como constante solar ($G_{\text{solar}} \approx 1367\ \text{W/m}^2$)[7].

Al atravesar la atmósfera, esta radiación sufre procesos de absorción y dispersión, descomponiéndose en dos componentes fundamentales al llegar a la superficie terrestre:

1. **Radiación directa horizontal** (G_D): Fracción que atraviesa la atmósfera sin desviarse, incidiendo directamente desde el disco solar. Es la componente que genera sombras proyectadas.
2. **Radiación difusa** (G_d): Fracción que ha sido dispersada (*scattering*) por moléculas y partículas atmosféricas, incidiendo desde todas las direcciones de la bóveda celeste.

Por lo tanto, para una superficie horizontal, la radiación global incidente (G_T) corresponde a la suma de estas dos componentes, como lo describe la ecuación 1.1:

$$G_T = G_D + G_d \tag{1.1}$$

Cabe destacar que, en planos inclinados o verticales (como fachadas), se debe considerar un tercer componente: la radiación reflejada por el entorno (albedo). La magnitud de ésta dependerá de la geometría solar (latitud, hora, día), características del entorno y la orientación de cada superficie.

En el contexto de una edificación, las ganancias solares a través de la envolvente resultan determinantes para el balance energético, siendo de gran relevancia las estrategias de diseño pasivo implementadas (proporción ventana-muro, protecciones solares, etc.).

1.2. Transferencia de calor en un edificio

El estado térmico interior de un edificio es inherentemente dinámico, resultado de la interacción continua con el medio exterior, la generación de cargas internas (ocupación, iluminación y equipamiento) y la acción de sistemas de climatización activos o pasivos.

Desde la física, la energía térmica se transfiere mediante tres mecanismos fundamentales: conducción, convección y radiación [6]. En el contexto de una edificación, a estos procesos se suman el transporte energético asociado al intercambio de masas de aire (ventilación e infiltraciones) y los flujos de calor latente derivados de la evaporación y la generación de humedad interior [5].

La envolvente –muros, techos, pisos y ventanas– constituye la interfaz que regula estos intercambios. A través de ella, el calor no solo se transmite, sino que también se almacena y libera con un desfase temporal, comportamiento que depende de las propiedades termofísicas de los materiales. Esta capacidad define la inercia térmica del edificio, concepto esencial para el desempeño pasivo y la estabilidad del ambiente interior.

1.2.1. Conducción

Es el mecanismo de transferencia de energía entre las partículas (átomos, moléculas, electrones) adyacentes en un material o sustancia debido a la interacción entre aquellas de mayor y menor energía cinética. En los sólidos opacos (como los materiales de construcción), es el principal modo de transferencia de calor a través de su masa [8].

A nivel macroscópico, la Ley de Fourier rige este fenómeno. Ésta establece que la tasa de flujo de calor ($\dot{Q}_{\text{cond}}$) en una dirección dada es proporcional al gradiente de temperatura en esa dirección (dT/dx) y al área transversal (A) a la dirección de transferencia. Para un material isotrópico en una dimensión, se tiene:

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = -kA\frac{dT}{dx} \qquad [\text{W}] \tag{1.2}$$

Donde k es la conductividad térmica (W/mK) del material, propiedad que cuantifica la capacidad de este para conducir el calor. El signo negativo indica que el flujo ocurre en la dirección de temperatura decreciente, satisfaciendo la Segunda Ley de la Termodinámica.

En el contexto de un edificio, si se considera, por ejemplo, un muro plano de espesor e en régimen estacionario, con temperaturas en ambos extremos definidas por T_1 y T_2, respectivamente, y asumiendo una conductividad k promedio, la ecuación 1.2 se integra linealmente como:

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = k\frac{A}{e}(T_1 - T_2) \qquad [\text{W}] \tag{1.3}$$

Esto permite notar que el flujo de calor depende directamente de la geometría y la materialidad. La relación e/k se conoce como Resistencia Térmica Conductiva (R), concepto fundamental para el dimensionamiento de aislaciones y el cálculo de la transmitancia térmica global (U) de la envolvente.

Puentes térmicos

En la práctica, la envolvente de un edificio rara vez es térmicamente homogénea. Se definen como puentes térmicos aquellas zonas puntuales o lineales donde la resistencia térmica del cerramiento se reduce significativamente respecto del área circundante. Esto ocurre principalmente por discontinuidades en la aislación, cambios en el espesor o composición del cerramiento, o por la penetración de elementos de alta conductividad (acero, hormigón, aluminio) a través de la capa aislante [5].

Su presencia altera el flujo de calor unidimensional ideal, transformándolo en un flujo multidimensional que incrementa la transferencia energética. Ejemplos recurrentes son los marcos metálicos de ventanas sin rotura de puente térmico (RPT), las uniones entre pilares o vigas y la fachada, y los encuentros de losas con muros exteriores.

Más allá del impacto en la eficiencia energética, en invierno estos puntos fríos representan un riesgo patológico: al presentar menor temperatura superficial que el resto del muro, favorecen la condensación y la proliferación de moho, comprometiendo la salubridad del ambiente interior y la durabilidad de los materiales [5].

1.2.2. Convección

Es el modo de transferencia de calor entre una superficie —como un muro o la piel de una persona— y un fluido adyacente. Este mecanismo mixto integra los efectos combinados de la conducción molecular en la capa límite del fluido con la superficie y el transporte macroscópico de energía debido al movimiento del mismo [8].

La tasa de transferencia de calor ($\dot{Q}_{\text{conv}}$) entre una superficie a una temperatura T_S y un fluido circundante a una temperatura T_∞ (suficientemente lejos de la superficie) es directamente proporcional a la diferencia de ambas temperaturas y el área de la superficie (A), tal como lo indica la Ley del enfriamiento de Newton, expresada en la ecuación 1.4:

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = hA(T_S - T_\infty) \qquad [\text{W}] \tag{1.4}$$

En la ecuación 1.4, h es el coeficiente de transferencia de calor por convección ($\text{W/m}^2\text{K}$). A diferencia de la conductividad térmica k, el coeficiente h no es una propiedad intrínseca del material, sino un parámetro empírico determinado por las propiedades del fluido (viscosidad, densidad, calor específico) y, fundamentalmente, por la naturaleza del flujo (laminar o turbulento) y su mecanismo de movimiento (convección natural o forzada) [8].

En edificios, este fenómeno presenta alta variabilidad dinámica:

- **En el exterior**: El coeficiente h suele ser elevado y fluctuante, dominado por la convección forzada debida a la velocidad del viento.
- **En el interior**: El intercambio es generalmente menor, predominando la convección natural por flotabilidad (diferencias de densidad del aire), salvo cuando operan sistemas mecánicos de ventilación o climatización que inducen movimiento forzado [5].

1.2.3. **Infiltraciones y ventilación**

Se define como el intercambio de masas de aire entre el ambiente interior y exterior debido a gradientes de presión. Este fenómeno se clasifica en ventilación (intercambio controlado, ej: ventanas o medios mecánicos) e infiltración (flujo no deseado a través de grietas en la envolvente). Las fuerzas impulsoras de estos flujos son la presión del viento y el efecto chimenea (diferencias de densidad por temperatura) [5].

El intercambio de aire supone una transferencia de calor sensible y latente a partir de las diferencias en la energía interna y contenido de humedad del aire. La carga sensible ($\dot{Q}_{\text{sensible}}$) asociada es la suma respectiva de las cargas por infiltraciones ($\dot{Q}_{\text{s,inf}}$) y ventilación ($\dot{Q}_{\text{s,vent}}$), asumiendo propiedades constantes para el aire:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{sensible}} &= \dot{Q}_{\text{s,inf}} + \dot{Q}_{\text{s,vent}} \\ &= \rho c_p \left(\dot{V}_{\text{inf}} + \dot{V}_{\text{vent}}\right) \cdot \Delta T \qquad [W] \end{aligned} \tag{1.5}$$

Donde ρ es la densidad del aire, c_p el calor específico, y $\dot{V}$ los caudales volumétricos de infiltración y ventilación.

Por su parte, la carga latente ($\dot{Q}_{\text{latente}}$) corresponde a la energía asociada al transporte de vapor de agua, calculada según la diferencia de humedad específica ($\Delta\omega$) y el calor de vaporización (h_v):

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{latente}} &= \dot{Q}_{\text{lat,inf}} + \dot{Q}_{\text{lat,vent}} \\ &= \rho h_v \left(\dot{V}_{\text{inf}} + \dot{V}_{\text{vent}}\right) \cdot \Delta\omega \qquad [W] \end{aligned} \tag{1.6}$$

Cabe mencionar que, para determinar la evolución de la humedad en el tiempo de un espacio interior, se realiza un balance de masa. En este cálculo dinámico, es común introducir un "factor de capacitancia", el cual aumenta virtualmente la masa de aire del recinto para representar la inercia higrométrica (capacidad de absorción y desorción) de los materiales y el mobiliario.

Por último, es importante señalar que las tasas de infiltración no solo dependen de la hermeticidad de la envolvente, sino también de la distribución de presiones sobre ésta. Estos gradientes de presión son inducidos tanto por el efecto chimenea (diferencia de temperaturas) como por la acción del viento, cuya intensidad varía según la topografía y exposición del edificio. Estudios locales indican que, en edificaciones con baja estanqueidad y expuestas a vientos constantes, las pérdidas por infiltración pueden representar una fracción significativa de la demanda térmica, llegando en casos críticos a superar el $40 - 50\%$ del consumo por climatización [9].

1.2.4. **Radiación térmica**

Corresponde a la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas como resultado de sus cambios en la configuración electrónica interna, dependiente directamente de su temperatura. Aunque teóricamente es un fenómeno volumétrico, para sólidos opacos (como hormigón, madera o metales) se considera un fenómeno superficial, ya que la radiación emitida por las capas interiores no logra atravesar el material y la incidente es absorbida en las primeras micras de profundidad [8].

Una superficie de un cuerpo ideal, o *cuerpo negro*[1], a una temperatura termodinámica T por encima del cero absoluto emite radiación térmica en todas direcciones por igual, y la cantidad emitida es mayor cuanto mayor es su temperatura. La potencia emisiva de un cuerpo negro (E_b) fue determinada por Joseph Stefan y Ludwig Boltzmann, estableciéndose como:

$$E_b = \sigma T^4 \qquad [\mathrm{W/m^2}] \tag{1.7}$$

Donde $\sigma = 5{,}67 \times 10^{-8}\ [\mathrm{W/m^2 \cdot K^4}]$ es la constante de Stefan-Boltzmann [8].

Sin embargo, una superficie real (o cuerpo gris) emite menos energía que un cuerpo negro. Esta relación se corrige mediante la emisividad (ε), una propiedad adimensional que cumple que $0 \leq \varepsilon \leq 1$:

$$\dot{q}_{\mathrm{emitida}} = \varepsilon \sigma T^4 \qquad [\mathrm{W/m^2}] \tag{1.8}$$

Análogamente, cuando la radiación incide ($\dot{q}_{\mathrm{incidente}}$) sobre una superficie opaca, una fracción es reflejada y otra es absorbida ($\dot{q}_{\mathrm{absorbida}}$). La fracción absorbida se denomina absortancia (α), cumpliendo también que $0 \leq \alpha \leq 1$:

$$\dot{q}_{\mathrm{absorbida}} = \alpha \dot{q}_{\mathrm{incidente}} \qquad [\mathrm{W/m^2}] \tag{1.9}$$

[1] Cuerpo idealizado que emite y absorbe radiación a la máxima tasa posible [8].

Por consiguiente, el balance neto de radiación para una superficie opaca se define como la diferencia entre lo emitido y lo absorbido:

$$\begin{aligned} \dot{q}_{\text{rad}} &= \dot{q}_{\text{emitida}} - \dot{q}_{\text{absorbida}} \\ &= \varepsilon\sigma T^4 - \alpha\dot{q}_{\text{incidente}} \qquad [\text{W/m}^2] \end{aligned} \tag{1.10}$$

Finalmente, la ley de Kirchhoff de la radiación señala que la emisividad y absortividad de una superficie para una temperatura T y longitud de onda λ dadas son iguales ($\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda$) cuando la fuente de irradiación se halla a la misma temperatura. En la práctica del estudio térmico de edificios, esta simplificación ($\varepsilon \approx \alpha$) es ampliamente aceptada cuando las temperaturas de la fuente y de la superficie son "moderadas[2]", o no difieren en más de unos pocos cientos de grados [8].

Factor de visión

La transferencia de calor por radiación entre superficies no depende únicamente de sus temperaturas y propiedades emisivas, sino fundamentalmente de la orientación relativa y la distancia de separación entre ellas. Para modelar matemáticamente esta dependencia geométrica se utiliza el concepto de Factor de Visión, tal como se ilustra conceptualmente en la Figura 1.1

[2] Se refiere al rango de temperaturas habituales en edificación (típicamente < 100 °C), donde la emisión espectral se concentra en el infrarrojo de onda larga, permitiendo asumir un comportamiento de cuerpo gris [8].

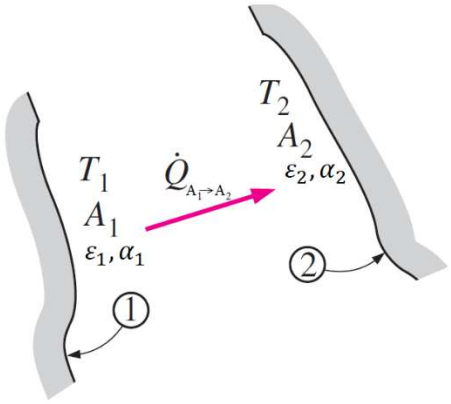


Figura 1.1 Intercambio de radiación entre dos superficies.
Fuente: Çengel & Ghajar [8].

El factor de visión ($F_{i\to j}$) es una cantidad adimensional puramente geométrica (independiente de la temperatura y longitud de onda para superficies difusas) que representa la fracción de la radiación que abandona la superficie i e impacta directamente sobre la superficie j. Su definición matemática se expresa como:

$$F_{1\to 2} = \frac{\dot{Q}_{1\to 2}}{\dot{Q}_{\text{total},1}} \tag{1.11}$$

Donde $\dot{Q}_{\text{total},1}$ es la radiación total que emite la superficie 1, y $\dot{Q}_{1\to 2}$ es la porción de esa energía que intercepta la superficie 2.

La determinación de estos factores en un recinto cerrado (como una oficina) conlleva una complejidad analítica considerable, ya que se debe cumplir la regla de reciprocidad y la regla de la suma (la suma de factores de visión desde una superficie hacia todas las demás debe ser igual a la unidad). Esto implica que, para el cálculo energético del edificio, es necesario resolver simultáneamente sistemas de ecuaciones matriciales que vinculen la geometría de todos los cerramientos [8].

Radiación infrarroja (de onda larga)

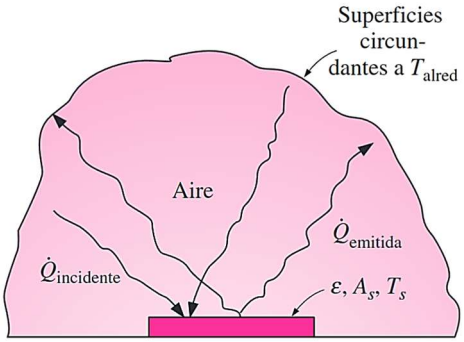


Figura 1.2 Intercambio de calor por radiación entre una superficie y las superficies que la rodean. Fuente: Çengel & Ghajar [8].

Cuando una superficie S de emisividad ε y área A a una temperatura T_S, está por completo envuelta ($F_{1\to2} = 1$) o encerrada, por una superficie mucho más grande (o negra) a una temperatura T_{alred} (cercana a T_S; por ley de Kirchhoff: $\alpha \approx \varepsilon$) y separada por un gas que no interfiere significativamente con la radiación (como aire seco), la tasa neta de transferencia de calor (W) por radiación se rige por la Ley de Stefan-Boltzmann modificada:

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \varepsilon\sigma A\left({T_S}^4 - {T_{\text{alred}}}^4\right) \qquad [\text{W}] \qquad (1.12)$$

Esta ecuación es la base para modelar el intercambio radiativo entre las superficies exteriores del edificio y su entorno. En el caso de una superficie horizontal (como una cubierta plana) que mira hacia el firmamento, se considera a la atmósfera como un cuerpo negro a una temperatura ficticia denominada Temperatura Efectiva del Cielo (T_{sky}). Dado que la atmósfera es transparente a ciertas longitudes de onda, T_{sky} suele ser considerablemente

menor que la temperatura del aire superficial (pudiendo llegar a valores de 260 [K] o inferiores), lo que genera el fenómeno de enfriamiento radiativo nocturno. La ecuación resultante es:

$$\dot{Q}_{\text{cielo,rad}} = \varepsilon\sigma A\left(T_S{}^4 - T_{\text{sky}}{}^4\right) \qquad [\text{W}] \qquad (1.13)$$

Tratándose de superficies inclinadas, el cálculo anterior se complejiza debido a que la fracción de cielo que envuelve a la superficie disminuye conforme aumenta el ángulo de inclinación ($F_{\text{S}\to\text{sky}} < 1$), llegando a ser nula a los 180°. Además, entra en juego la temperatura efectiva del suelo $T_{\text{ef,grd}}$, pues la porción de la superficie que no "mire" al cielo, lo hará hacia el suelo (si no hay nada más de por medio). No obstante, es posible incorporar esta información a través de una corrección en la temperatura aparente del cielo, como se muestra enseguida [7]:

$$T_{\text{f,sky}}{}^4 = F_{\text{S}\to\text{sky}} \cdot T_{\text{sky}}{}^4 + \left(1 - F_{\text{S}\to\text{sky}}\right) \cdot T_{\text{ef,grd}}{}^4 \qquad [\text{K}^4] \qquad (1.14)$$

De este modo, la pérdida o ganancia radiativa de cualquier superficie exterior de la envolvente se puede generalizar mediante la ecuación extendida:

$$\dot{Q}_{\text{rad,ext}} = \varepsilon\sigma A\left(T_S{}^4 - T_{\text{f,sky}}{}^4\right) \qquad [\text{W}] \qquad (1.15)$$

Radiación solar (de onda corta)

A diferencia de la radiación térmica emitida por el entorno terrestre, la energía proveniente del Sol (G_T, ecuación 1.1) corresponde a radiación de onda corta ($\lambda < 3{,}0\ \mu\text{m}$ - debido a la alta temperatura de la fuente, aprox. 5.777 [K]). Cuando

esta radiación incide sobre una superficie opaca del edificio, una fracción es reflejada y el resto es absorbida. Esta fracción absorbida se define mediante la absortividad solar (α_s), un coeficiente adimensional que depende de las propiedades ópticas del material y del color de su superficie [8].

Por lo tanto, el balance neto de radiación ($\dot{Q}_{\text{neta,rad}}$) en una superficie horizontal de área A expuesta a la intemperie es la suma algebraica de la ganancia solar absorbida y el intercambio de onda larga con el cielo, expresado en la ecuación 1.16:

$$\dot{Q}_{\text{neta,rad}} = \alpha_s A G_T + \varepsilon \sigma A \left({T_{\text{sky}}}^4 - {T_S}^4 \right) \qquad [\text{W}] \qquad (1.16)$$

Es fundamental distinguir entre la absortividad solar (α_s) y la emisividad térmica (ε). Aunque la Ley de Kirchhoff iguala absorción y emisión ($\alpha \approx \varepsilon$), esto solo es válido para una misma longitud de onda. En la física de edificios:

1. Onda Corta (Solar): El espectro solar (0,3 – 3,0 μm). Rige: α_s.
2. Onda Larga (infrarroja): La emisión de cuerpos a temperatura ambiente o moderada ($\lambda > 3{,}0\ \mu\text{m}$). Rige: $\alpha \approx \varepsilon$.

Esta distinción es relevante, ya que materiales como algunas pinturas claras pueden tener una baja absorción solar ($\alpha_s \approx 0{,}2$) para rechazar el calor del día, pero una alta emisividad térmica ($\varepsilon \approx 0{,}9$) para enfriarse radiativamente por la noche.

Finalmente, para una superficie S inclinada (como cubiertas o fachadas), la radiación solar total incidente ($G_{T,S}$) varía respecto del escenario horizontal (G_T), dependiendo de la orientación y la pendiente. El cálculo de $G_{T,S}$ requiere descomponer la radiación en tres componentes: directa (haz solar), difusa

(dispersada por la atmósfera) y reflejada (por el suelo circundante), utilizando modelos geométricos como el de isotropía del cielo o modelos anisotrópicos [7].

Cerramientos acristalados

A diferencia de los elementos opacos, las superficies semitransparentes —como ventanas o muros cortina— permiten la transmisión parcial de la radiación solar incidente. La energía se desglosa en tres componentes: una fracción es reflejada (r), otra es absorbida por el material (α) y el resto es transmitida (τ) directamente al interior del recinto. Por el principio de conservación de energía, la suma de estos coeficientes (absortancia, reflectancia y transmitancia) debe ser igual a la unidad [7]:

$$\alpha + r + \tau = 1 \tag{1.17}$$

El flujo total de calor solar que atraviesa un acristalamiento se cuantifica mediante el Coeficiente de Ganancia de Calor Solar (SHGC por sus siglas en inglés). Este coeficiente representa la fracción de la radiación solar incidente sobre el cristal que se convierte en ganancia térmica útil en el interior, y se compone de dos mecanismos:

1. La transmisión solar directa (τ_S).
2. La porción de la energía absorbida por el vidrio que luego es transferida hacia el interior por convección y radiación térmica.

Matemáticamente, esto se expresa como:

$$\text{SHGC} = \tau_s + f_i \alpha_s \tag{1.18}$$

Donde f_i es la fracción de la radiación solar absorbida que luego es transmitida hacia el ambiente interior. Es importante notar que la energía absorbida calienta el vidrio, y este calor fluye tanto hacia el exterior como hacia el interior, dependiendo de las resistencias térmicas superficiales; f_i cuantifica qué tanto de ese calor absorbido termina eventualmente dentro del recinto [5].

Finalmente, es necesario distinguir cómo interactúan los elementos de sombra con el flujo radiativo. Por un lado, los elementos exteriores (edificios vecinos, vegetación, aleros) actúan como máscaras geométricas que bloquean la radiación directa antes de que ésta incida sobre la superficie vidriada, reduciendo la carga solar disponible. Y, por otro lado, los elementos interiores (cortinas, persianas) no modifican la radiación incidente, sino que alteran las propiedades ópticas del sistema acristalado en su conjunto (transmitancia, absortancia y reflectancia), regulando la ganancia térmica una vez que la radiación ya ha impactado el acristalamiento.

1.2.5. **Ganancias internas**

Al interior de un edificio, se producen procesos de conversión de energía que resultan en la liberación de calor desde fuentes eléctricas, químicas o mecánicas. Estas fuentes, denominadas ganancias internas, provienen principalmente de los equipos electrónicos, los sistemas de iluminación y la propia *actividad metabólica*[3] de los ocupantes.

[3] Conjunto de reacciones bioquímicas que efectúan las células de un organismo vivo para sintetizar o degradar sustancias (RAE, 2024), generando calor en el proceso.

Ocupación

Las personas generan calor de forma continua como resultado de su metabolismo. La tasa de generación de calor depende directamente del nivel de actividad física, así como de variables biológicas como el sexo, la edad y la superficie corporal. Esta magnitud se cuantifica mediante el índice metabólico, el cual en adultos varía desde ≈40 [W/m²] durmiendo (0,7 met) hasta 400–500 [W/m²] en actividades físicas muy intensas; el trabajo de oficina sedentario se sitúa entre 55 y 70 [W/m²] (1,0–1,2 [met]), es decir, del orden de 100–125 [W] para un adulto promedio con ≈1,8 [m²] de superficie corporal [5], [8].

El calor cedido por las personas se divide en calor sensible (transferido por convección y radiación) y calor latente (asociado a la evaporación de humedad por respiración y transpiración); ambos componentes deben considerarse en los balances térmico y de humedad del recinto.

Equipos e iluminación

Los dispositivos eléctricos y electrónicos (computadores, servidores, luminarias) liberan calor de forma proporcional a su consumo energético. Según el primer principio de la termodinámica, la mayor parte de la energía eléctrica consumida por estos equipos termina degradándose en calor sensible que se disipa al aire del recinto. En el caso de la iluminación, la ganancia de calor incluye tanto la convección desde la luminaria como la radiación térmica absorbida por las superficies de la habitación.

Por lo tanto, para una estimación precisa de la carga térmica en una simulación energética, es imperativo caracterizar correctamente los siguientes factores:

- **Perfiles de ocupación**: Horarios y densidad de personas por metro cuadrado.
- **Régimen de actividad**: Definición del índice metabólico promedio según la función del local.
- **Densidad de carga eléctrica**: Potencia instalada en iluminación y equipos (W/m^2) con sus respectivos factores de uso o fraccionamiento de carga [5].

1.2.6. **Inercia térmica**

La inercia térmica se define como la capacidad de un material o elemento constructivo para almacenar energía térmica y liberarla paulatinamente. Esta propiedad depende intrínsecamente de la masa, la densidad (ρ), el calor específico (c_p) y la conductividad térmica (k) de los materiales, así como de la geometría del cerramiento [8].

En un edificio, los cerramientos actúan como la frontera de intercambio energético. Bajo condiciones de régimen transitorio (donde las temperaturas exteriores varían continuamente), una envolvente con alta inercia térmica no transmite el calor instantáneamente. Por el contrario, absorbe gran parte de la energía fluctuante, generando dos fenómenos fundamentales ilustrados en la Figura 1.3:

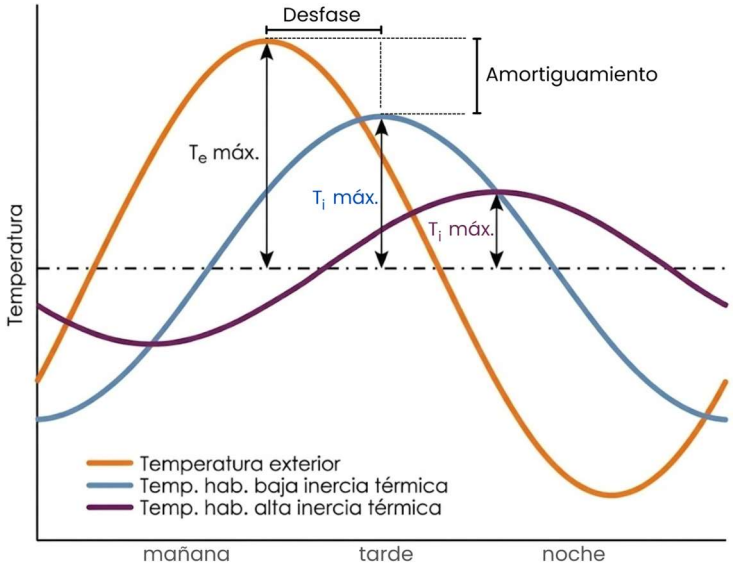


Figura 1.3 Efecto de la inercia térmica: Amortiguamiento de la amplitud térmica y desfase temporal. Fuente: Elaboración propia.

1. **Amortiguamiento** (*Decrement Factor*): La variación de la temperatura interior es considerablemente menor que la oscilación exterior. Los *peaks* de calor o frío son atenuados por la masa del edificio.
2. **Desfase** (*Time Lag*): Existe un retraso temporal entre el momento en que se produce la temperatura máxima exterior y el momento en que ese calor llega al interior.

Este comportamiento es ideal para climas con alta oscilación térmica diaria, ya que permite desplazar las cargas térmicas hacia la noche, estabilizando la temperatura interior y reduciendo potencialmente el consumo energético.

Sin embargo, la inercia térmica no es beneficiosa en todos los escenarios. Su efectividad depende en gran medida del régimen de uso del edificio. En espacios de ocupación intermitente (como viviendas de fin de semana o auditorios de uso breve), una alta masa térmica puede ser contraproducente. En estos casos, el sistema de climatización debe invertir una gran cantidad de energía y tiempo

en calentar o enfriar la masa de los muros antes de alcanzar la temperatura de confort en el aire, lo que podría ocurrir cuando el tiempo de ocupación ya ha finalizado, resultando en una ineficiencia energética operativa [5].

1.3. Confort térmico

De acuerdo con la norma ASHRAE 55, el confort térmico se define como "aquella condición mental que expresa satisfacción con el ambiente térmico"[5]. Esta definición implica no solo la ausencia de sensaciones de calor o frío, sino un estado de equilibrio fisiológico y psicológico.

Desde una perspectiva física, el confort se alcanza cuando existe un balance neto nulo entre el calor generado por el metabolismo humano y el calor disipado hacia el entorno. El cuerpo funciona como un sistema termorregulado que debe mantener su temperatura interna constante (homeostasis, ≈37 °C). Si el calor generado supera al disipado, la temperatura corporal aumenta (sensación de calor); si la disipación es excesiva, la temperatura desciende (sensación de frío).

La complejidad del fenómeno radica en la interacción simultánea de múltiples variables, las cuales se clasifican en dos grandes grupos:

1. **Factores ambientales**: Condiciones físicas del entorno (temperatura, humedad, velocidad del aire, radiación).
2. **Factores individuales**: Características propias del ocupante (actividad física y vestimenta).

Para evaluar objetivamente esta sensación subjetiva, el modelo más aceptado y utilizado en ingeniería es el propuesto por P.O. Fanger (base de la norma

ISO 7730). Este método cuantifica el grado de incomodidad mediante el índice PMV (Voto Medio Estimado), el cual predice la respuesta promedio de un grupo numeroso de personas utilizando una escala de siete puntos, que va desde -3 (frío) hasta +3 (muy caluroso), siendo el 0 el valor de neutralidad térmica ideal [10].

1.3.1. Parámetros ambientales

Las condiciones del entorno que definen el intercambio de calor entre el cuerpo humano y el espacio se clasifican en cuatro variables fundamentales [5], [8]:

Temperatura del aire (T_a)

Es la temperatura del aire que rodea al ocupante (temperatura de bulbo seco). Es el factor determinante para el intercambio de calor por convección. Para entornos de oficina, el rango de confort se sitúa habitualmente entre los 18 °C y 25 °C, dependiendo de la estación del año y la vestimenta.

Humedad relativa del aire (HR)

Influye en la capacidad del cuerpo para disipar calor mediante la evaporación (calor latente) a través de la piel y la respiración. Una HR superior al 70% dificulta la evaporación del sudor, provocando sensación de sofoco, mientras que valores inferiores al 30% pueden causar sequedad en las mucosas y problemas de electricidad estática.

Temperatura radiante media (TRM)

Se define como la temperatura uniforme de una superficie imaginaria con la que el ocupante intercambiaría la misma cantidad de calor por radiación que con las superficies reales del entorno (muros, ventanas, techos). La TRM es determinante en edificios con grandes superficies acristaladas o muros con baja inercia, ya que superficies muy frías o calientes pueden causar incomodidad incluso si la temperatura del aire es óptima.

Velocidad del aire (v_a)

Afecta tanto al intercambio por convección como a la tasa de evaporación. Si bien el movimiento del aire ayuda a la refrigeración en verano, velocidades excesivas pueden generar corrientes de aire molestas (*drafts*). Se recomienda que la velocidad no supere los 0,15 [m/s] en invierno y los 0,30 [m/s] en verano para evitar sensaciones de enfriamiento localizado [8].

1.3.2. Parámetros individuales

A diferencia de las variables ambientales, los parámetros individuales dependen exclusivamente del ocupante y explican por qué la percepción térmica puede variar significativamente entre distintas personas situadas en un mismo recinto.

Vestimenta

La ropa funciona como una capa de aislamiento térmico que reduce la pérdida de calor desde la piel hacia el ambiente. Para cuantificar este efecto en los

estudios de confort, se utiliza el índice de vestimenta, cuya unidad es el clo. Un valor de 1 [clo] representa el aislamiento térmico necesario para mantener el equilibrio térmico de una persona en reposo en un ambiente a 20 °C con 50% de humedad relativa y sin movimiento de aire notable. La equivalencia física de esta unidad se expresa en la ecuación 1.19 [5]:

$$1[\text{clo}] = 0{,}155 \left[\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}\right] \tag{1.19}$$

En la práctica de la simulación energética, se suelen adoptar valores de 0,5 [clo] para el periodo de verano (ropa ligera) y 1,0 [clo] para el invierno (ropa de abrigo típica de interiores) [5].

Nivel de actividad

El nivel de actividad física determina la tasa de generación de calor metabólico. Durante la actividad, el cuerpo transforma energía química en trabajo mecánico y calor; este último debe ser disipado para evitar el aumento de la temperatura corporal. La unidad de medida es el met, cuya unidad (1,0 [met]) representa la tasa metabólica de una persona promedio sentada y en reposo. La equivalencia técnica se define en la ecuación 1.20 [5]:

$$1{,}0[\text{met}] = 58{,}15[\text{W/m}^2] \tag{1.20}$$

Para actividades de oficina o trabajo sedentario, los valores típicos oscilan entre 1,1 [met] y 1,3 [met]. Es importante destacar que este valor se refiere a la

potencia por unidad de superficie de piel del individuo (*área de DuBois*[4]), la cual se estima en 1,8 [m^2] para un adulto promedio [8].

1.3.3. Evaluación de la sensación térmica – Método Fanger

Debido a la naturaleza subjetiva del confort, el método más extendido para su evaluación cuantitativa es el desarrollado por P.O. Fanger, el cual utiliza la estadística para predecir la respuesta de un grupo numeroso de personas. Este procedimiento, estandarizado por la norma ISO 7730 [10], integra las variables ambientales e individuales mediante dos índices complementarios: el Voto Medio Estimado (PMV) y el Porcentaje de Personas Insatisfechas (PPD).

Voto Medio Estimado – PMV

El índice PMV (*Predicted Mean Vote*) predice el valor promedio de los votos de sensación térmica en una escala de siete niveles, que va desde el frío intenso hasta el calor extremo (ver Tabla 1.1).

Tabla 1.1 Escala de sensación térmica de Fanger. Fuente: Adaptado de ISO 7730 [10].

+3	Muy caluroso
+2	Caluroso
+1	Ligeramente caluroso
0	Neutro
-1	Ligeramente fresco
-2	Fresco
-3	Frío

[4] El área de Dubois se refiere a la fórmula utilizada para calcular el área de superficie corporal (ASC); fundamental en medicina para la dosificación de medicamentos y evaluaciones de salud.

El cálculo del PMV se basa en la ecuación de balance térmico del cuerpo humano, la cual considera la tasa metabólica, el aislamiento de la ropa y las cuatro variables ambientales. Debido a la complejidad matemática de la ecuación paramétrica de Fanger (ver Anexo A [10]), su resolución suele realizarse mediante software. Sin embargo, para fines de diseño rápido, la norma ISO 7730 proporciona tablas simplificadas que permiten estimar el confort. La Tabla 1.2 presenta un extracto de dichos valores para una actividad típica de oficina (1,2 [met]), mostrando cómo la *temperatura operativa*[5] óptima varía según la vestimenta y la velocidad del aire.

Tabla 1.2 Valores de PMV para actividad de oficina (1,2 [met]) y humedad relativa del 50%. Fuente: Adaptado de UNE-EN ISO 7730:2005 [10].

Vestimenta [clo]	**Temperatura operativa** [°C]	**Velocidad relativa del aire** [m/s]		
		<0,10	0,15	0,20
0,75	20	-0,77	-0,92	-1,04
	22	-0,25	-0,40	-0,51
	24	0,27	0,12	0,03
	26	0,78	0,64	0,57
	28	1,29	1,17	1,12
1,00	18	-0,75	-0,88	-0,98
	20	-0,32	-0,45	-0,54
	22	0,13	0,00	-0,07
	24	0,58	0,46	0,40
	26	1,03	0,91	0,86

[5] Temperatura uniforme de un recinto negro donde un ocupante intercambiaría calor a la misma tasa que en el actual intercambio mixto por radiación y convección del ambiente real no uniforme (ISO 7730:2005) [10].

La Tabla 1.2 corresponde a un extracto de la Tabla E.3 de la norma UNE-EN ISO 7730:2005 [10], en la cual se dan valores del PMV para variados contextos ambientales con una precisión mejor que 0,1 PMV (siempre que la diferencia entre la temperatura del aire y la temperatura radiante media sea menor a 5 °C)

Se puede observar que, por ejemplo, para un índice de vestimenta bajo, típico de verano (0,75 [clo]), con una temperatura operativa de 24 °C y una ligera brisa (0,20 [m/s]), se obtiene una sensación térmica casi neutra (PMV = 0,03).

Porcentaje de Personas Insatisfechas – PPD

Dado que los votos individuales se distribuyen estadísticamente alrededor del promedio, Fanger desarrolló el índice PPD (*Predicted Percentage Dissatisfied*). Este representa el porcentaje de ocupantes que considerarían el ambiente como térmicamente desagradable. La relación entre ambos índices es empírica y se define por la ecuación 1.21[10]:

$$\mathrm{PPD} = 100 - 95\exp(-0{,}03353 \cdot PMV^4 - 0{,}2179 \cdot PMV^2) \qquad (1.21)$$

Como se observa en la Figura 1.4, el PPD mínimo es de un 5%, lo que implica que, incluso en condiciones de neutralidad térmica (PMV = 0), siempre existirá un pequeño porcentaje de personas insatisfechas debido a la variabilidad individual. Internacionalmente, se acepta un rango de confort cuando el PPD ≤ 10%, lo que equivale a un PMV comprendido entre -0,5 y +0,5.

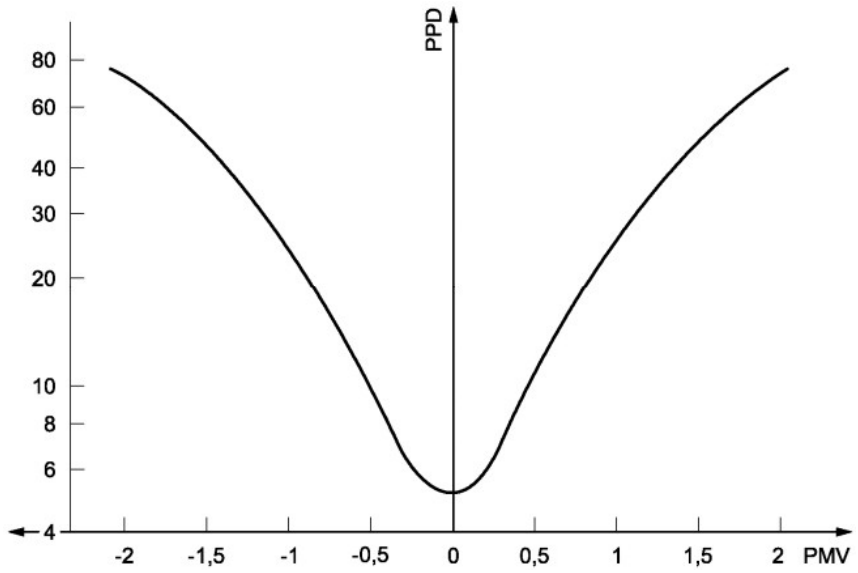


Figura 1.4 Relación entre PPD y PMV
(Fuente: Elaboración propia basado en ISO 7730:2005 [10])

Limitaciones: Incomodidades locales

Es fundamental notar que el método de Fanger evalúa la sensación térmica global. Sin embargo, un usuario puede sentirse insatisfecho debido a fenómenos locales, tales como:

- Corrientes de aire: Enfriamiento localizado por velocidades excesivas.
- Estratificación térmica: Diferencia de temperatura excesiva entre los tobillos y la cabeza.
- Asimetría radiante: Presencia de superficies a temperaturas muy distintas (ej. una ventana fría junto a una pared cálida).

1.4. **Climatización**

La climatización, de modo general, corresponde al proceso de acondicionar un ambiente interior mediante el uso combinado de estrategias de diseño pasivo y sistemas mecánicos activos para el abatimiento de la carga térmica. La finalidad trasciende la simple calefacción o refrigeración de un espacio, buscando controlar simultáneamente variables como temperatura, humedad, el movimiento y calidad del aire.

Este enfoque integral tiene por objetivo garantizar el confort higrotérmico de los ocupantes o satisfacer las condiciones técnicas particulares de un proceso industrial dado. De acuerdo con los estándares de diseño de la ASHRAE [5], un sistema integral debe ser capaz de gestionar el Confort Térmico y la Calidad del Aire Interior (IAQ, por sus siglas en inglés) respondiendo a tres objetivos funcionales a lo largo del ciclo anual, tal como se resume en la Tabla 1.3:

Tabla 1.3 Objetivos funcionales de un sistema de climatización [5].

Calefacción y Humectación	➔	Condiciones higrotérmicas adecuadas en invierno.
Refrigeración y Deshumectación	➔	Condiciones higrotérmicas adecuadas en verano.
Filtrado del aire, Circulación y Ventilación	➔	Condiciones de salubridad durante todo el año.

Por otro lado, para dimensionar o seleccionar adecuadamente un sistema de climatización activa o HVAC (*Heating, Ventilation and Air Conditioning*), primero es necesario cuantificar la demanda energética del recinto (Carga Térmica), evaluar las opciones tecnológicas disponibles (Sistemas Activos y

Estrategias Pasivas) y evaluar su desempeño considerando confort térmico, calidad del aire, e indicadores de Eficiencia Energética.

1.4.1. Carga térmica

La carga térmica se define como la energía calorífica que debe agregarse o extraerse de un espacio para mantener condiciones específicas o de confort. Su magnitud varía temporalmente dependiendo del balance instantáneo entre ganancias internas, condiciones ambientales, y los diversos mecanismos de transferencia de calor a través de la envolvente [5].

Operacionalmente, en el ciclo invernal el sistema debe suministrar calor para compensar las pérdidas térmicas. En contraste, durante el ciclo estival, se necesita extraer calor para contrarrestar las ganancias; distinguiendo entre carga sensible (aumento o reducción de la temperatura seca del aire) y carga latente (humidificación/deshumidificación). Esta última distinción es relevante, pues en climas más húmedos o recintos de alta ocupación, la energía requerida para condensar la humedad podría representar una fracción significativa de la demanda total.

Para su cuantificación, los procedimientos establecidos por ASHRAE [5] clasifican las metodologías en dos categorías principales según el objetivo o enfoque del análisis:

1. **Dimensionamiento – Capacidad máxima requerida**: Se emplean las condiciones climáticas extremas ("Día de Diseño") para determinar la potencia máxima y definir el tamaño de los equipos.

2. **Análisis Energético (Simulaciones)**: Se utilizan modelos dinámicos junto con datos de un año típico meteorológico de la zona para estimar la demanda térmica anual o estacional y el consumo energético real.

1.4.2. Sistemas activos

Se clasifica como sistemas activos (HVAC) al conjunto de equipos mecánicos que requieren un aporte de energía externa (eléctrica, térmica o combustibles fósiles) para operar y modificar las condiciones de ambiente interior [5]. Termodinámicamente, su función es transferir calor o masa para abatir las cargas sensibles y latentes, forzando el flujo de energía térmica en dirección opuesta al gradiente natural o directamente convirtiendo energía potencial (combustible) en calor.

Desde un punto de vista funcional, estos sistemas se estructuran en dos grandes categorías que interactúan [5]:

1. **Sistemas Primarios (Planta Central/Generación)**: Equipos encargados de la conversión de energía para la producción de frío o calor (ej. calderas, *chillers*, bombas de calor, torres de enfriamiento).
2. **Sistemas Secundarios (Distribución y Terminales)**: Redes y equipos que transportan el fluido caloportador (agua, aire o refrigerante) y gestionan la transferencia final hacia las zonas de demanda (ej. UTAS, *Fan-Coils,* difusores).

El principio de operación más extendido para la climatización reversible moderna es el ciclo de compresión de vapor, el cual permite bombear calor

desde una fuente a baja temperatura hacia un sumidero a alta temperatura mediante el aporte de trabajo mecánico al compresor [5], [6].

Dentro de esta clasificación funcional, el ASHRAE Handbook [5] distingue además configuraciones según el fluido que transporta la energía hasta la zona acondicionada —sistemas todo-aire, aire-agua, todo-agua y de expansión directa (unitarios, incluyendo bombas de calor y equipos de volumen de refrigerante variable)—, cada una con ventajas propias en flexibilidad de control, costo y facilidad de integración de equipos de generación centralizada. Asimismo, el diseño, control y eficiencia mínima exigible de estos sistemas están normados por ASHRAE 90.1, referencia adoptada habitualmente como línea base de desempeño energético para instalaciones HVAC [5].

1.4.3. **Estrategias pasivas**

Se definen como el conjunto de soluciones arquitectónicas y constructivas diseñadas para captar, proteger, almacenar o disipar energía térmica utilizando exclusivamente los ciclos naturales del clima, sin dependencia de energía auxiliar mecánica.

Este enfoque se enmarca en el concepto de *Arquitectura Bioclimática*, la cual busca restablecer la relación entre el edificio y el microclima local para alcanzar condiciones de confort con un consumo energético mínimo [11].

Desde la perspectiva de la transferencia de calor, estos mecanismos físicos se clasifican funcionalmente en tres categorías [7]:

1. **Control de Ganancias**: Elementos que regulan la entrada de radiación solar (orientación, relación ventana-muro y protecciones solares).

2. **Conservación y Almacenamiento**: Estrategias que minimizan las pérdidas y modulan la oscilación térmica mediante el aislamiento y la masa térmica (inercia).
3. **Disipación Natural**: Mecanismos de enfriamiento mediante ventilación natural o enfriamiento radiativo nocturno.

Su implementación reduce la carga térmica base que posteriormente asumen los sistemas activos, siendo determinantes para la eficiencia global del sistema.

1.4.4. Eficiencia energética

La eficiencia energética de un sistema de climatización se define como la relación entre el efecto térmico útil obtenido (calefacción o refrigeración) y la energía consumida para lograrlo (generalmente trabajo eléctrico). Dado que estos equipos operan bajo ciclos termodinámicos, su rendimiento varía dinámicamente según las condiciones de temperatura interior y exterior.

Para evaluar su desempeño se utilizan tres indicadores estandarizados, los cuales son explicados a continuación [5], [6].

COP (Coefficient of Performance)

Es el principal indicador de eficiencia de una máquina térmica. Corresponde a la razón entre el efecto térmico útil y la potencia eléctrica consumida ($\dot{W}_{\text{eléct}}$) en un instante dado. Según el modo de operación [6]:

Modo Calefacción:

$$\mathrm{COP_{HP}} = \frac{\dot{Q}_{\mathrm{H}}}{\dot{W}_{\mathrm{eléct}}} \tag{1.22}$$

Con $\dot{Q}_{\mathrm{H}}$ el calor entregado al recinto.

Modo Refrigeración:

$$\mathrm{COP_{R}} = \frac{\dot{Q}_{\mathrm{L}}}{\dot{W}_{\mathrm{eléct}}} \tag{1.23}$$

Con $\dot{Q}_{\mathrm{L}}$ el calor extraído del recinto.

Un valor más alto de COP denota una conversión más eficiente de electricidad en capacidad de climatización.

SPF (Seasonal Performance Factor)

A diferencia del COP, que indica la eficiencia instantánea de una máquina en un punto de operación específico, el Factor de Desempeño Estacional (SPF) evalúa la eficiencia global del sistema completo a lo largo de un periodo de operación —típicamente una temporada o un año completo.

Se define como la relación entre la energía térmica total útil ($\sum Q_{\mathrm{útil}}$) y la energía eléctrica total consumida ($\sum W_{\mathrm{total}}$) durante dicho periodo. Es crucial que el término de consumo eléctrico incluya no solo la unidad principal (ej. compresor de una bomba de calor), sino también todos los consumos auxiliares del sistema, como bombas de circulación, ventiladores y la electrónica de control [5], [6]:

$$\mathrm{SPF} = \frac{\sum Q_{\mathrm{útil}}}{\sum W_{\mathrm{total}}} \tag{1.24}$$

Esta métrica es la más representativa para estudios de simulación energética, pues captura de forma integral los efectos de las condiciones de borde variables, las pérdidas por acumulación y distribución, y la penalización en el rendimiento por operación a carga parcial.

El ASHRAE Handbook [5] señala que estos indicadores —COP y SPF— no solo describen el desempeño físico del sistema, sino que constituyen la base de comparación frente a los valores mínimos de eficiencia exigidos por ASHRAE 90.1 para cada categoría de equipo, estableciendo así el umbral de aceptabilidad normativa de una instalación de climatización.

1.5. **Almacenamiento de energía térmica (TES)**

El almacenamiento de energía térmica (*Thermal Energy Storage*, TES) corresponde al conjunto de tecnologías que permiten acumular energía calorífica o frigorífica modificando la temperatura, fase o estructura química de una sustancia para su uso posterior. Su incorporación es clave para flexibilizar la operación de sistemas energéticos y HVAC, permitiendo integrar fuentes intermitentes y mejorar la eficiencia termodinámica global [12], entre otras aplicaciones.

Según su clasificación técnica —descrita en la revisión de Arteconi et al. [12] y profundizada en Santos et al. [13]—, estos sistemas se agrupan en tres categorías según el fenómeno físico utilizado para almacenar la energía.

1.5.1. Almacenamiento por calor sensible

En este método, la energía se almacena mediante el aumento o disminución de la temperatura de un medio de almacenamiento —líquido o sólido — sin que ocurra un cambio de fase. La cantidad de calor almacenado es directamente proporcional a la masa, el calor específico y la variación de temperatura del material (ΔT) [12].

El desempeño de estos sistemas depende intrínsecamente de las propiedades termofísicas del medio, específicamente, de la densidad energética ($\rho \cdot c_p$), lo cual determina el volumen requerido para almacenar una carga térmica dada. Los medios más utilizados incluyen agua, lechos de roca y hormigón.

Medios Líquidos: Agua

El agua es el estándar en aplicaciones comerciales por su alto calor específico (4,18 [kJ/kg · K]) [6], bajo costo, facilidad de transporte y madurez tecnológica. Su principal ventaja es la capacidad de estratificación térmica, fenómeno que permite mantener capas de agua a diferentes temperaturas dentro del mismo tanque, contribuyendo a una mayor eficiencia de los generadores térmicos. Como factor en contra, su densidad energética es baja (aprox. 100 [MJ/m^3] para un $\Delta T = 25$ °C) [7], requiriendo grandes volúmenes de instalación.

Medios Sólidos

Se emplean medios sólidos como rocas, hormigón o el propio suelo. Son comunes en sistemas estacionales o de alta temperatura, pero presentan limitaciones en la cinética de carga y descarga. Esto se debe a que la transferencia de calor

interna ocurre predominantemente por conducción, un mecanismo intrínsecamente más lento y no regulable dinámicamente durante la operación (limitado por una difusividad térmica cuasi estática).

1.5.2. Almacenamiento por calor latente

Estos sistemas se basan en la absorción o liberación de calor cuando el medio de almacenamiento, denominado Material de Cambio de Fase (PCM, por sus siglas en inglés), experimenta una transición de estado físico. A diferencia del calor sensible, el proceso ocurre a una temperatura casi constante.

Dado que el calor latente de cambio de fase es mayor en comparación con el calor sensible que el mismo medio almacena en un rango de temperatura acotado ($c_p \cdot \Delta T$), los sistemas con PCM ofrecen una densidad energética superior. Por ejemplo, el hielo libera unas 16 veces más energía por unidad de masa al fundirse que agua líquida con un salto de 5 [K] [6]. Esto se traduce en una reducción significativa del volumen de almacenamiento requerido. Sin embargo, materiales como las parafinas o hidratos de sal suelen presentar una baja conductividad térmica, lo que a menudo obliga a implementar mejoras en el diseño de los intercambiadores (como aletas o matrices de grafito) para garantizar velocidades de carga y descarga adecuadas [14].

1.5.3. Almacenamiento en materiales termoquímicos

El almacenamiento termoquímico utiliza la energía involucrada en reacciones químicas reversibles o procesos de sorción. En la carga, se suministra calor para disociar un compuesto químico (reacción endotérmica), almacenando la energía en

los productos de la reacción por tiempo indefinido y sin pérdidas térmicas, siempre que los componentes se mantengan separados. Durante la descarga, los componentes se recombinan (reacción exotérmica) liberando la energía almacenada.

Estos sistemas presentan la mayor densidad energética teórica de las tres tecnologías y una capacidad única: pérdidas térmicas prácticamente nulas durante el almacenamiento, ya que la energía se conserva como potencial químico. Esto los convierte en la solución ideal teórica para el almacenamiento estacional, aunque su implementación comercial es compleja debido a los requerimientos de reactores específicos y control de transferencia de masa. Los pares de materiales más investigados para aplicaciones de baja y media temperatura incluyen zeolitas, gel de sílice y diversos hidratos de sal, operando generalmente bajo ciclos de adsorción/desorción de vapor de agua [14].

1.6. **Simulación Energética de Edificios (BES)**

El desempeño térmico-energético de un edificio, como se discutió en las secciones anteriores, resulta de la interacción dinámica de múltiples factores. Siguiendo a Sarabia [15], estos pueden agruparse en cinco categorías fundamentales (ver Figura 1.5): las condiciones climáticas exteriores, las características de la envolvente, las condiciones interiores de ocupación y cargas, el equipamiento —en términos de potencia y rendimiento— y las estrategias de control. La complejidad de esta interacción es lo que motiva el uso de herramientas de simulación para predecir el comportamiento del edificio.

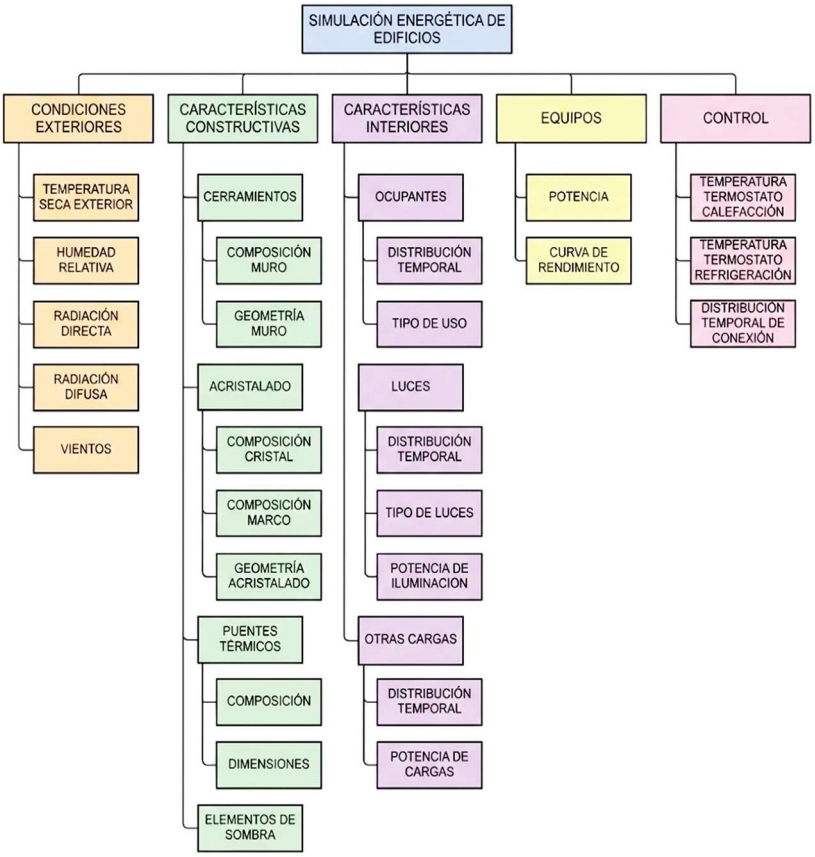


Figura 1.5 Factores que configuran el desempeño térmico de edificios
(Fuente: Elaboración propia basado en Sarabia, 2010 [15])

El Modelamiento o Simulación Energética de Edificios (BES, *Building Energy Simulation*, también denominada BEPS o BEM) corresponde al conjunto de metodologías y herramientas orientadas a predecir el comportamiento térmico y el consumo energético de una edificación a partir de modelos matemáticos de su geometría, materialidad, sistemas y condiciones de operación. Sus aplicaciones van desde evaluación energética en fases tempranas de diseño, estudios de respuesta estacional, *retrofit* o cambios de uso u operación; aportando información de utilidad para la implementación de estrategias de gestión energética.

De acuerdo con la clasificación ampliamente aceptada en la literatura [16], el BES puede agruparse en tres categorías principales según el nivel de conocimiento físico incorporado y su dependencia de datos históricos:

1.6.1. Modelos de caja blanca (físicos)

Los modelos físicos, también denominados "*forward modeling*" se basan en la resolución explícita de las ecuaciones fundamentales de transferencia de calor y masa a partir de la geometría, las propiedades de los materiales y los sistemas del edificio. Son ampliamente utilizados en procesos de diseño, operación y *retrofit* de edificios, así como en el desarrollo de estándares de eficiencia energética [17]. No requieren, a priori, datos de operación previos para generar una predicción. Dependiendo de la resolución espacial y temporal, se subdividen en tres niveles de complejidad [18]:

Métodos CFD (*Computational Fluid Dynamics*)

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) representa el nivel más alto de detalle espacial entre los tres enfoques de modelamiento físico. Se basa en la resolución numérica de las ecuaciones de Navier-Stokes (conservación de masa, momento y energía) dividiendo el volumen de aire en miles o millones de celdas discretas.

Este enfoque permite visualizar campos complejos de velocidad, temperatura y concentración de contaminantes en 3D, siendo tradicionalmente indispensable para estudiar fenómenos locales como la estratificación térmica en atrios, la dispersión de humos o el confort térmico asimétrico. Softwares comerciales

como ANSYS Fluent o COMSOL Multiphysics son referentes en este campo, aunque su altísimo costo computacional lo hace menos viable para simulaciones energéticas anuales de edificios completos.

Método Multizona o Nodal

Es el enfoque predominante en la Simulación Energética de Edificios. Se basa en la suposición de "mezcla perfecta", donde cada habitación (o zona térmica) se representa como un nodo único con temperatura y presión uniformes. Bajo este esquema —conocido como método de balance de calor (HBM, *Heat Balance Method*) y adoptado como estándar del campo por ASHRAE [5]— se plantea un balance simultáneo de energía para el aire de cada zona y para cada superficie interior, mientras que la conducción a través de la envolvente se resuelve mediante funciones de transferencia u otros esquemas numéricos equivalentes.

Estos modelos resuelven los balances de energía y masa de forma acoplada para todo el edificio a lo largo de periodos extensos (ej. un año completo) con pasos de tiempo reducidos de horas o minutos. Su principal ventaja es la velocidad de cálculo, lo que permite evaluar el consumo energético anual, dimensionar equipos y realizar análisis de sensibilidad. Herramientas como EnergyPlus, TRNSYS, IES<VE> o IDA-ICE operan bajo estos principios.

Método Zonal

El método zonal surge como un compromiso intermedio entre la complejidad del CFD y la simplicidad de los modelos nodales. Consiste en dividir un espacio en un número reducido de sub-zonas macroscópicas (típicamente entre 10 y 100 por habitación) para capturar heterogeneidades térmicas sin el costo computacional

de una malla fina. Es útil para evaluar la distribución de temperatura en grandes volúmenes, aunque requiere conocimiento previo de los patrones de flujo para definir las conexiones entre zonas [19].

1.6.2. **Modelos de caja negra (estadísticos o *data-driven*)**

A diferencia de los enfoques físicos, los modelos de "caja negra" o basados en datos no requieren información geométrica ni de las propiedades de los materiales de la envolvente. En su lugar, emplean técnicas de aprendizaje automático — regresión lineal múltiple, Redes Neuronales Artificiales (RNA) y Máquinas de Soporte Vectorial (SVM), entre otras— para "aprender" la relación entre variables climáticas, operacionales y de ocupación (entradas) y el consumo energético o la temperatura interior (salidas) [20].

Su principal fortaleza es la alta precisión predictiva cuando se dispone de grandes volúmenes de datos históricos (Big Data) del edificio en operación. Sin embargo, tradicionalmente han carecido de capacidad de generalización: un modelo entrenado con los datos de un edificio no es directamente aplicable a otro, ni permite anticipar el impacto de cambios constructivos (p. ej., reemplazar las ventanas), pues no "entiende" la física subyacente al cambio, sino que reproduce correlaciones estadísticas observadas en el pasado. No obstante, estudios recientes [21] indican que esta limitación ha comenzado a atenuarse mediante técnicas de transferencia de aprendizaje (*transfer learning*), que reutilizan el conocimiento de un modelo ya entrenado en un edificio "fuente" para acelerar el entrenamiento de un modelo en un edificio "objetivo" con datos escasos. Por tanto, la dependencia de datos masivos por edificio, presentada como una condición

limitante casi absoluta, es hoy un desafío que la literatura aborda activamente, más que una barrera estructural insalvable de los métodos de caja negra.

1.6.3. Modelos híbridos (Caja Gris)

Los modelos de caja gris combinan una estructura física simplificada —típicamente un circuito RC equivalente de bajo orden (2R2C, 3R2C) que representa tanto la envolvente como el volumen de aire interior— con parámetros (resistencias y capacitancias efectivas) que no se calculan a partir de sus propiedades físicas, sino que se identifican estadísticamente mediante técnicas de optimización inversa ajustadas a datos reales de operación. Son especialmente valiosos para el desarrollo de controladores predictivos (Model Predictive Control - MPC) en circunstancias donde es complejo medir u obtener planos detallados pero resulta factible instalar sensores para calibrar un modelo simplificado [22].

Este tipo de modelos carecen de procedimientos estandarizados o ampliamente adoptados, pues son desarrollados de manera ad-hoc para cada caso de estudio, resolviendo partes del problema mediante entornos de cálculo de propósito general (p. ej., MATLAB o Python).

1.6.4. Métodos numéricos para cálculo de cargas térmicas

El cálculo de las cargas térmicas de calefacción y refrigeración representa el núcleo del modelamiento energético de edificaciones, al cuantificar la tasa de remoción o aportación de energía necesaria para mantener el aire interior dentro

de rangos definidos de confort térmico. Físicamente, la inercia térmica del edificio genera una distinción entre las **ganancias de calor** (energía térmica que ingresa o se genera en el recinto en un instante dado) y la **carga térmica real** (la tasa a la cual el aire absorbe energía). Esta diferencia está mediada, naturalmente, por las características de la interfaz o envolvente del edificio.

Para resolver matemáticamente este comportamiento transitorio, las herramientas de simulación energética emplean tres enfoques metodológicos principalmente, diferenciados por su grado de rigor físico y complejidad computacional:

- **Método del Balance de Calor (*Heat Balance Method*, HBM)**: Es el enfoque dinámico más riguroso y basado en primeros principios, el HBM resuelve de forma simultánea los balances de calor no lineales en las superficies exteriores e interiores de la envolvente, así como en el nodo de aire de cada zona térmica. Este método evalúa de manera desagregada la conducción en los muros, la convección superficial y los intercambios radiantes de onda corta (solar directa y difusa) y onda larga (intercambio entre superficies interiores, cielo y terreno) mediante matrices geométrico-ópticas de factores de forma o coeficientes de Gebhart/Hottel. Aunque el HBM garantiza la conservación estricta de la energía y una alta precisión física, exige un costo computacional elevado y un volumen considerable de parámetros de entrada [5].

- **Métodos de Funciones de Transferencia de Conducción (CTF) y Series Temporales Radiantes (RTSM)**: Desarrollados históricamente para acelerar la simulación en régimen transitorio mediante la suposición de linealidad y superposición, estos métodos descomponen cada ganancia de calor en una fracción convectiva instantánea (que se convierte directamente en carga) y una fracción radiante retenida por la masa térmica. La

conducción a través de los muros opacos se resuelve habitualmente mediante Funciones de Transferencia de Conducción (*Conduction Transfer Functions*, CTF) o Factores de Respuesta basados en transformadas z o inversas de Laplace. No obstante, estos métodos presentan una limitación insuperable: asumen propiedades constantes y lineales. Por tanto, los esquemas CTF resultan inviables cuando la envolvente integra, por ejemplo, almacenamiento de energía térmica (TES) o materiales de cambio de fase (PCM), donde la relación temperatura-entalpía es fuertemente no lineal. En tales casos, los motores de simulación deben recurrir a diferencias finitas o los métodos de entalpía [5].

- **Modelos de Parámetros Concentrados y Redes de Resistencia-Capacitancia (RC/Grey-Box)**: Basados en la analogía entre la transferencia de calor y la conducción eléctrica, estos modelos representan las temperaturas de las zonas y envolventes mediante nodos interconectados a través de resistencias térmicas (R, K/W) y capacitancias térmicas (C, J/K). Dependiendo de la complejidad requerida, la literatura abarca desde estructuras reducidas de bajo orden (1R1C, 2R2C o variantes como 3R2C2α), pasando por análisis comparativos de topologías intermedias (4R1C frente a 3R2C), hasta esquemas de mayor resolución que desagregan capacitancias independientes para distintos elementos de la envolvente y para el aire interior (como el modelo 4R3C). Los modelos RC pueden formularse bajo enfoques directos (*forward*, calculando parámetros a partir de propiedades geométricas y materiales) o inversos/estocásticos (*inverse/grey-box*, identificando los parámetros mediante optimización no lineal o máxima verosimilitud a partir de datos medidos) [23].

1.6.5. **Calibración y validación de modelos**

La utilidad predictiva de un modelo de simulación energética radica en su capacidad para reproducir la respuesta física del sistema real bajo estudio. Este proceso de conciliación entre la simulación y la realidad comprende dos etapas conceptuales distintas [24]:

- **Calibración:** Corresponde al proceso sistemático de identificación y ajuste de los parámetros de entrada inciertos del modelo (propiedades térmicas de la envolvente, tasas de infiltración, perfiles operacionales) con el objetivo de reducir las discrepancias entre las salidas simuladas y las mediciones experimentales.

- **Validación:** Es la verificación formal e independiente de que el modelo calibrado representa el sistema físico real con el nivel de precisión requerido para su propósito final, evaluando su desempeño predictivo sobre periodos o condiciones operacionales no utilizados durante la etapa de ajuste.

Análisis de Sensibilidad

Dado que los modelos energéticos involucran un elevado número de parámetros de entrada, el Análisis de Sensibilidad (SA, por sus siglas en inglés) se constituye como la etapa previa fundamental para la calibración, permitiendo jerarquizar la influencia de cada variable sobre las salidas del modelo y reducir la dimensionalidad del espacio de búsqueda. Se clasifica formalmente en dos enfoques generales [25]:

- **Métodos locales (LSA):** Evalúan el impacto de perturbaciones individuales en un parámetro a la vez alrededor de un valor base fijo (p. ej., Enfoque *One-At-a-Time*, OAT). Asumen un comportamiento lineal del

sistema y son computacionalmente eficientes, pero no detectan las interacciones entre variables.

- **Métodos globales (GSA):** Exploran simultáneamente todo el espacio de variabilidad de los parámetros mediante técnicas de muestreo estocástico o cuasi-aleatorio (como el método de Morris, el muestreo por Hipercubo Latino [LHS] o métodos basados en varianza como Sobol'). Permiten cuantificar efectos no lineales y la interacción mutua entre parámetros, a costa de un mayor costo computacional.

Métodos de calibración

En la literatura especializada se distinguen dos paradigmas principales para el ajuste de modelos [26]:

- **Calibración manual:** Proceso iterativo y pragmático fundamentado en el juicio técnico y la experiencia del modelador, quien modifica los parámetros de entrada mediante prueba y error respaldándose en inspecciones en terreno, herramientas gráficas y análisis de balances de energía.

- **Calibración automatizada:** Procedimiento no supervisado que acopla el motor de simulación con un algoritmo de optimización matemática (p. ej., Algoritmos Genéticos, *Particle Swarm Optimization* [PSO], método Hooke-Jeeves o inferencia bayesiana) o metamodelos. El algoritmo ajusta de forma autónoma las variables de entrada para minimizar una función objetivo definida, como el error cuadrático acumulado entre datos simulados y medidos.

Criterios de validación

La evaluación cuantitativa del ajuste entre los datos simulados y los medidos se realiza mediante indicadores estadísticos estandarizados. Cuando se dispone de datos de consumo energético (facturas o mediciones continuas), el estándar de referencia internacional es la ASHRAE Guideline 14 [27] (junto con protocolos como IPMVP y FEMP), la cual define dos métricas principales:

- **Error de Sesgo Medio Normalizado (**NMBE**):** Cuantifica el sesgo global o la tendencia sistemática del modelo a sobre o subestimar la variable objetivo.

$$\mathrm{MBE} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(X_{\mathrm{i,sim}} - X_{\mathrm{i,med}})}{n-1} \tag{1.25}$$

$$\mathrm{NMBE} = \frac{\mathrm{MBE}}{\bar{X}_{\mathrm{med}}} \tag{1.26}$$

- **Coeficiente de Variación del Error Cuadrático Medio (**CV(RMSE)**):** Mide la dispersión puntual relativa y la variabilidad de las predicciones respecto a la media de las mediciones.

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_{\mathrm{i,sim}} - X_{\mathrm{i,med}})^2}{n-1}} \tag{1.27}$$

$$\mathrm{CV(RMSE)} = \frac{\mathrm{RMSE}}{\bar{X}_{\mathrm{med}}} \tag{1.28}$$

Donde:

- n es el número de datos en el período.
- $X_{\mathrm{i,med}}$ y $X_{\mathrm{i,sim}}$ corresponden a los valores medidos y simulados, respectivamente.
- $\bar{X}_{\mathrm{med}}$ corresponde al valor promedio de los valores medidos.

Según la ASHRAE Guideline 14 [27], un modelo energético se considera calibrado si cumple con los siguientes umbrales de tolerancia:

- **Datos mensuales:** $|\text{NMBE}| \leq 5\%$ y $\text{CV(RMSE)} \leq 15\%$.
- **Datos horarios:** $|\text{NMBE}| \leq 10\%$ y $\text{CV(RMSE)} \leq 30\%$.

En estudios donde la validación no se realiza sobre el consumo energético sino sobre **variables de estado internas** —como la temperatura del aire interior (T°), común en análisis de confort térmico, edificaciones pasivas o en flotación libre (*free-floating*)—, se utilizan estos mismos estadísticos con criterios de aceptación habitualmente más exigentes (p. ej., $\text{CV(RMSE)} \leq 7\%$ [28]), o bien métricas de dispersión directa como el Error Cuadrático Medio (RMSE) junto con el coeficiente de determinación (R^2).

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

Este capítulo revisa y discute el estado del arte que contextualiza y fundamenta el desarrollo del presente trabajo. Se organiza en tres ejes de discusión: (i) panorama de herramientas de Simulación Energética de Edificios (BES/BEPS); (ii) metodologías de calibración y validación de modelamiento térmico-energético; y (iii) almacenamiento térmico (TES) aplicado a sistemas HVAC, gestión de demanda y microrredes.

2.1. **Panorama de herramientas BES/BEPS**

El desarrollo de herramientas computacionales para la simulación energética de edificios ha evolucionado desde los primeros métodos de balance estacionario, hacia entornos de simulación transitoria que van desde enfoques nodales o de mezcla perfecta hasta arquitecturas de co-simulación multizona capaces de resolver fenómenos acoplados de transferencia de calor y transporte de masa. Las herramientas tradicionales de zona de mezcla uniforme resultan computacionalmente eficientes para balances globales, evaluación energética de edificios completos o dimensionamiento de sistemas HVAC, sin embargo, introducen desviaciones severas cuando se aplican a recintos con fuerte estratificación térmica o geometrías complejas [18], [29].

Un caso ilustrativo de esta limitación es analizado por Lu et al. [29], quienes acoplan un modelo zonal de velocidad propagada (VPZ) con la plataforma DeST para simular un atrio de oficinas de 24 metros de altura subdividido en 72 subzonas. Al contrastar este enfoque zonal contra el modelo nodal simplificado del mismo programa, los autores demuestran que el modelo simplificado sobreestima la carga de enfriamiento máxima en un 28% (15,3 [kW] frente a los 11,9 [kW] del modelo acoplado) y triplica la carga de calefacción máxima en invierno (7,2 [kW] frente a 2,5 [kW]). Esta discrepancia se atribuye a que el modelo nodal fija la temperatura del aire directamente en la consigna superior de confort sin representar el gradiente vertical real.

Para resolver la distribución tridimensional del aire en espacios climatizados, Wang et al. [18] implementan un esquema de co-simulación externa dinámica entre EnergyPlus y ANSYS Fluent. Al contrastar las predicciones del modelo acoplado contra datos experimentales en un recinto de oficinas en Wuhan, verifican que la co-simulación superó con creces la precisión de las simulaciones aisladas en CFD, identificando que una velocidad de inyección de 3 m/s a un ángulo de 45° optimiza simultáneamente el confort térmico y el consumo del ventilador.

En el ámbito de la caracterización de materiales avanzados, Mazzeo et al. [30] realizan una intercomparación experimental entre TRNSYS, EnergyPlus e IDA ICE evaluando celdas de prueba (*Solar Test Boxes*) con y sin paneles de Material de Cambio de Fase (PCM) en la base. Los resultados confirman que mientras TRNSYS destaca en el cálculo de la radiación solar directa a través de acristalamientos en recintos convencionales, IDA ICE alcanza la mayor fidelidad predictiva en recintos con PCM (menor RMSE y mayor R^2) debido a la integración

del módulo PCM-WALL, el cual resuelve explícitamente la histéresis del material entre las curvas de fusión y solidificación mediante el método de la entalpía.

Por su parte, Phiri et al. [31] y Ahmed et al. [32] sitúan la frontera de investigación actual en la transición hacia modelos híbridos "physics-informed" (PIML) y técnicas de aprendizaje por transferencia (*transfer learning*) para superar la rigidez del ajuste físico tradicional. Los autores destacan experimentos como el de Fang et al., donde un modelo pre-entrenado en un edificio fuente con un año de datos fue transferido a un edificio de destino en distinta zona climática utilizando solo dos semanas de mediciones, logrando reducir el error MAPE en un 20% respecto a un modelo entrenado desde cero. Sin embargo, tanto Phiri et al. como Ahmed et al. identifican como una brecha persistente la escasez de *datasets* de campo estandarizados y abiertos que permitan auditar estos algoritmos de forma reproducible.

2.2. Metodologías de Calibración y Validación de Softwares y Modelos Energéticos

La validez de las predicciones de un modelo numérico depende de su sometimiento a protocolos estandarizados de validación y métricas de error normadas [27].

Validación de softwares de simulación: el procedimiento BESTEST

La validación de programas de simulación energética de edificios se basa en la metodología de tres vías desarrollada por NREL: verificación analítica

(contraste con soluciones exactas), validación empírica (contraste con mediciones) y comparación entre programas [24]. En esta última se inscribe BESTEST (*Building Energy Simulation Test and Diagnostic Method*) desarrollado por Judkoff y Neymark [24].

No obstante, Magni et al. [33], tras comparar ocho motores frente a un caso de oficina idéntico, advierten que, si bien BESTEST es fundamental para aislar errores en el código, la dispersión aceptable del estándar puede alcanzar hasta un 47% en ciertas pruebas de envolvente. Por ello, concluyen que la validación debe complementarse siempre que sea posible con datos empíricos de alta resolución [33].

Paradigma de calibración: manual vs. automatizada

En relación al ajuste de modelos, Cornaro et al. [34] comparan la calibración manual y automática (IDA ICE + GenOpt) en un edificio de oficinas real en Roma. La calibración manual logró un RMSE de temperatura de 0,35 °C y 0,62 °C para dos zonas, frente a 0,27 °C y 0,42 °C de la automática. En consumo energético, la automática obtuvo un NMBE de +2,11% y un CV(RMSE) de 8,37%, frente a −7,69% y 9,66% de la manual. Los autores concluyen que los métodos automáticos asistidos por análisis de sensibilidad (como el método de Morris) aceleran sustancialmente la convergencia y reducen el sesgo introducido por el modelador en edificios complejos. No obstante, advierten que su desempeño sigue dependiendo de la experiencia del operador para configurar y supervisar el algoritmo; es decir, "automática" no equivale a "libre de juicio experto".

Calibración por consumo vs. temperatura

Para la calibración de modelos operacionales por consumo, la ASHRAE Guideline 14 y el protocolo IPMVP definen los límites estadísticos de aceptación [27], [34]. Para datos horarios, la Guideline 14 exige un Error de Sesgo Medio Normalizado (NMBE) $\leq \pm 10\%$ y un Coeficiente de Variación del Error Cuadrático Medio (CV(RMSE)) $\leq 30\%$ (límite que el IPMVP reduce a $\leq 20\%$) [27].

Cuando la evaluación no busca predecir consumo, sino confort térmico o la respuesta pasiva, la calibración debe realizarse sobre la variable de estado de temperatura del aire interior (T°) [28], pudiendo complementarse con otras. Este es el enfoque aplicado en recintos en régimen de flotación libre (*free-floating*) o sin climatización activa.

Sarna et al. [28] desarrollan una metodología de calibración empírica en cuatro etapas para una vivienda unifamiliar con ventilación natural, mediante co-simulación EnergyPlus–CONTAM. Para aislar las propiedades de la envolvente, desacoplan los fenómenos: primero calibran las infiltraciones en CONTAM mediante gas trazador; luego ejecutan la co-simulación en periodos desocupados sin ganancias internas para ajustar la capacitancia y resistencia de los muros; y finalmente incorporan las ganancias internas y la operación de ventanas. Este procedimiento multi-etapa reprodujo el perfil dinámico de temperaturas horarias con una precisión muy superior a las exigencias normativas, confirmando la necesidad de una calibración desglosada por variable de estado para garantizar la confiabilidad física de modelos pasivos [28].

Métricas estadísticas para validación de modelos térmicos

Respecto de la validación de modelos energéticos, Johra et al. [35] sistematizan 48 métricas utilizadas en la literatura. Su aporte más útil no es el catálogo en sí, sino la discusión de sus fallas comunes. Señalan que las métricas normalizadas por el promedio de los datos medidos —como el CV(RMSE) o el NMBE— se vuelven inestables o engañosas cuando esos valores están cerca de cero (por ejemplo, demanda de calefacción en verano) o varían estacionalmente: para un mismo sesgo constante, el CV(RMSE) resulta mucho mayor en periodos de baja demanda, pudiendo cambiar en órdenes de magnitud según se normalice mensual o anualmente. Asimismo, el coeficiente de determinación (R^2) no cambia si se introduce un sesgo constante en la demanda de referencia y en el modelo por igual, mientras que el CV(RMSE) sí lo hace. En consecuencia, cada métrica debe analizarse en perspectiva para evitar contar historias distintas a partir de un mismo resultado [35].

2.3. Almacenamiento de Energía Térmica (TES) para sistemas HVAC

Panorama general y contexto local

Los Tanques de Agua Estratificada (TTES, por sus siglas en inglés) representan una de las soluciones más maduras en climatización para desacoplar la generación térmica de la demanda. Santos et al. [13], en su reciente revisión, señalan que al usar la energía directamente estos sistemas

alcanzan eficiencias cercanas al 100%, con vidas útiles de 25 a 40 años y una huella de GEI entre 70% y 85% menor que las baterías de Li-ion.

En el contexto nacional, Maximov [36] evalúa el TES en dos escalas. En el sistema eléctrico, demuestra que un almacenamiento térmico por bombeo (PTES, *Pumped Thermal Energy Storage*) de unas 8 horas permite absorber vertimientos solares y eólicos, aumentando la penetración fotovoltaica y reduciendo costos del sistema hacia 2050. En calefacción, propone una red distrital solar con almacenamiento estacional en pozos (*borehole*) para el sur de Chile, competitiva frente a opciones convencionales y con menores emisiones al desplazar calderas a gas. En ambos casos, el TES aporta la flexibilidad que exige la descarbonización.

Almacenamiento sensible en agua: estratificación y desempeño

La eficiencia de un TTES depende críticamente de la estabilidad de la termoclina (capa que separa las masas de agua de distinta densidad). Karim et al. [37] mediante la simulación de cinco geometrías de estanque, identifican tres factores que gobiernan la estratificación: la relación de aspecto (H/D), cuya reducción de 3,8 a 1,0 incrementa el coeficiente de mezcla interna en 143%; la diferencia de temperatura entre el agua entrante y la almacenada, cuya reducción de 80 °C a 10 °C incrementa la mezcla en 303%; y la velocidad de entrada, cuya reducción favorece la formación de la termoclina. Observan además que, una vez establecida la termoclina, el caudal de carga puede aumentarse sin deteriorar significativamente la estratificación. Esto resulta especialmente relevante en el almacenamiento de agua helada, cuyos saltos térmicos (5–10 K) son pequeños y, por tanto, más propensos a la mezcla.

Abd Majid et al. [38], mediante un ajuste no lineal Dosis-Respuesta en un tanque operacional real de enfriamiento distrital, extrajeron métricas de la termoclina (posición, espesor y Figura de Mérito) a partir de perfiles verticales de temperatura, hallando que la mayor mezcla ocurre en la zona inferior, junto a los difusores de entrada. Por su parte, Tipasri et al. [39], al optimizar la geometría bajo un esquema de carga nocturna y descarga diurna, determinaron que una relación H:D = 2,0 es óptima para un sistema de climatización de 300 TR (chiller de 350 TR), reduciendo el consumo eléctrico anual en un 15,4% y el costo bajo tarifa horaria en un 51,7%.

Almacenamiento latente (PCM) en oficinas

Karwacki [40] evaluó en un banco de pruebas a escala 1:10 un acumulador con PCM comercial (parafina RT15, fusión 10-17 °C) aplicado al enfriamiento de oficinas. Aunque el PCM ofrece una mayor densidad energética volumétrica que el agua, su baja conductividad térmica intrínseca penaliza las tasas de carga y descarga, exigiendo intercambiadores de mayor complejidad; una limitación transversal a esta tecnología y no específica de un material, según confirman Santos et al. [13].

2.4. HVAC+TES para gestión de demanda e integración en microrredes

Gestión de demanda (DSM/DR) y flexibilidad térmica

La Gestión de la Demanda (DSM, *Demand-Side Management*) agrupa las estrategias orientadas a modificar el patrón de consumo eléctrico del usuario final,

clasificadas por Palensky y Dietrich [41] según su velocidad de respuesta y nivel de intervención. La Respuesta de la Demanda (DR) ocupa un lugar intermedio en este espectro, activada por una señal externa del operador del sistema (por ejemplo, un precio variable según franja horaria). La flexibilidad térmica es el caso particular de esta capacidad que explota la inercia del edificio o de un sistema de almacenamiento asociado, permitiendo adelantar, postergar o modular el consumo de climatización sin que el usuario perciba pérdida de confort.

En Chile, la Ley 21.305 de Eficiencia Energética [42] ya está en régimen de implementación. Las empresas con consumos superiores a 50 teracalorías anuales (Consumidores con Capacidad de Gestión de Energía, CCGE) deben reportar anualmente sus consumos al Ministerio de Energía e implementar un Sistema de Gestión de Energía en un plazo de doce meses desde la publicación del listado oficial (Ley 21.305, art. 2°). La fiscalización recae en la SEC, que en 2025 ya cursó las primeras multas por incumplimiento. Este marco regulatorio incentiva directamente la flexibilidad térmica, como aplica Jofré Escárate [42] en una estación de servicio en Vitacura, donde el control manual y automático de la climatización logró ahorros mensuales de aproximadamente 27% y 29,6%, respectivamente, demostrando que una simple pero eficaz estrategia de gestión puede impactar de manera significativa en la demanda y consumo final.

Yin et al. [43] evalúan el potencial del "Ajuste Global de Temperatura" (*Global Temperature Adjustment*) contrastando simulaciones paramétricas con datos de campo de 831 eventos de DR en 192 oficinas. Con 34 °C exteriores, la reducción de potencia medida fue de 4,7 a 11,1 [W/m²]. Las simulaciones capturaron esta flexibilidad con una desviación promedio de 0,7 [W/m²] (17%), aunque el desempeño varía según zona climática y antigüedad del edificio. Por otra parte, de Chalendar et al. [44] realizaron ensayos en seis edificios comerciales

incrementando la consigna de enfriamiento en 2 °F (~1,1 °C), demostrando que es posible construir modelos probabilísticos de respuesta utilizables por operadores de red sin afectar el confort.

Control predictivo (MPC) en sistemas HVAC+TES

El control basado en reglas fijas de carga y descarga —como el esquema de carga nocturna y descarga diurna de Tipasri et al. [39], que sigue un horario predefinido independiente de las condiciones reales del día— es la lógica de control más simple y la más extendida en sistemas HVAC+TES operativos. Su limitación es igualmente simple: no se adapta cuando la demanda real, el precio de la electricidad o la disponibilidad renovable se apartan del patrón asumido al definir el horario. El control predictivo (MPC) surge para resolver justamente esa rigidez, anticipando la dinámica térmica del edificio y del propio sistema de almacenamiento en vez de seguir un horario fijo.

Bisogno Bernardini et al. [23], en su revisión de 70 artículos sobre modelos de resistencia-capacitancia (RC), documentan cómo estos modelos "*grey-box*" se consolidan como el compromiso preferido entre precisión física y eficiencia computacional para control en tiempo real. De los casos que reseñan, un modelo *grey-box* en esquema MPC logró ahorros de costo de enfriamiento de hasta 7,7%, cifra cercana al 8,9% de un modelo detallado equivalente, pero a una fracción de su costo computacional.

Integración de TES en microrredes

Ahmed et al. [32] revisan un centenar de estudios de IA/ML aplicada a gestión energética de edificios, clasificándolos según su nivel de integración con la red

eléctrica: independiente, habilitado por IoT, o integrado a una microrred. Dentro de esta última categoría, Ondó Oná-Ayécaba et al. [45] analizan la integración de sistemas de almacenamiento térmico compacto residencial (ECHO-TES) mediante co-simulación OpenDSS–Python sobre la red de distribución real de Crevillente. Los autores demuestran que el despacho coordinado de los acumuladores térmicos mitiga la congestión en transformadores y estabiliza los perfiles de voltaje en baja tensión frente a la intermitencia fotovoltaica, operando como un almacenamiento virtual sin perturbar la frecuencia del sistema.

A una escala mayor, Luo et al. [46] dimensionan y validan con datos operativos reales un sistema TES centralizado (45,84 [MW] / 328,95 [MWh]) acoplado a la red de calefacción distrital de una microrred en la península de Liaodong, noreste de China —200 [MW] de capacidad eólica instalada y una interconexión limitada a solo 60 [MW]—, destinado a absorber los excedentes eólicos que de otro modo se verterían. Los autores comparan tres escenarios: sin almacenamiento, con una caldera eléctrica (EB) y con el sistema TES. Frente al caso base (aprovechamiento eólico de 81,12% y penalización anual por vertimiento de USD 5,92 millones), la caldera eléctrica ya mejora el resultado a 94,20% (USD 1,82 millones) al convertir el excedente eólico en calor en el instante en que ocurre; el TES lo supera aun así, alcanzando 96,85% (USD 0,99 millones), ya que además de convertir ese excedente en calor, lo almacena para usarlo cuando más conviene —una flexibilidad temporal que la caldera no ofrece. El caso ilustra, a escala de una microrred insular, el mismo principio que Ondó Oná-Ayécaba et al. aplican a una red de distribución local: el TES absorbe específicamente los excedentes térmicamente aprovechables que el almacenamiento eléctrico convencional no atiende con la misma eficiencia de costos.

CAPÍTULO 3

MEDICIONES TÉRMICAS

Para caracterizar la respuesta térmica dinámica del inmueble y obtener la base empírica necesaria para la posterior calibración y validación del modelo, se realizó una campaña de monitoreo *in situ* durante el periodo estival (enero-febrero 2017). Esta fase permitió capturar la oscilación libre del edificio, aislando el comportamiento de la envolvente, su inercia térmica y el impacto de las ganancias solares.

El registro abarcó dos semanas con una resolución temporal de 15 minutos, integrando tanto variables meteorológicas forzantes como condiciones higrotérmicas interiores de diversas zonas. Ante la falta de una estación local completa, se aplicó una fusión de datos multiespacial utilizando registros de temperatura y humedad del Laboratorio de Óptica y Ambiente de la Universidad de Santiago de Chile [47], ubicado en la comuna de Estación Central, junto con datos de radiación solar de la estación Cerro Calán del Departamento de Astronomía de la Universidad de Chile (DAS) [48], ubicada en la comuna de Las Condes; estrategia sustentada en la estabilidad macro-climática estival de la cuenca de Santiago. Finalmente, es preciso mencionar que no se midieron ni recolectaron datos de dirección ni velocidad del viento, lo cual constituye una limitación a considerar.

A continuación, se detallan la ubicación y detalles generales del inmueble y la metodología de instrumentación aplicada; los datos registrados se presentan al cierre del capítulo.

3.1. Ubicación y características generales del inmueble

El edificio se encuentra emplazado en el Campus Santiago - San Joaquín de la Universidad. La ubicación específica dentro del campus se muestra resaltada en la siguiente imagen, donde también se aprecia su orientación respecto del norte.



Figura 3.1 Ubicación del edificio (Fuente: Google maps)

En la Figura 3.1 ha de notarse que el edificio presenta una rotación azimutal (–10° hacia el oeste) respecto al norte geográfico. La flecha azul indica el acceso principal (cara frontal) del edificio por el suroeste.



Figura 3.2 Vistas de edificio de Ingeniería Mecánica

La Figura 3.2 ilustra la fachada y el entorno del inmueble, el cual se encuentra rodeado por tres edificios en las orientaciones norte, este y oeste que actúan como elementos de sombreamiento para la envolvente térmica.

Arquitectónicamente, el edificio se organiza en tres niveles diferenciados (ver Anexo B: planimetría del edificio): un nivel subterráneo de planta libre, con ligeramente mayor superficie útil, y dos niveles superiores vinculados por una escalera frontal. La primera planta está distribuida en cinco oficinas y un pasillo, mientras que el segundo nivel corresponde a un salón único. Entre ambos pisos se dispone de un plenum técnico o entrepiso de 45 cm para

instalaciones y, en la parte superior, la estructura culmina con un entretecho de un metro que funciona como zona de amortiguación térmica bajo la cubierta.

3.2. Metodología de medición higrotérmica

Se establece medir temperatura y humedad relativa en variadas zonas del inmueble y en torno a la oficina principal durante un tiempo cercano a dos semanas.

Los registradores de datos son instalados de a dos por cada punto (temperatura del aire y humedad relativa) en seis ubicaciones de cinco zonas del edificio: dos puntos de medición en la oficina principal, uno en la oficina adyacente, uno en el pasillo, uno en el laboratorio subterráneo, y uno sobre el cielo de la oficina (entre–piso).



Figura 3.3 Registradores Tinytag de temperatura y humedad, respectivamente

Los instrumentos obtienen datos instantáneos y son programados para realizar un registro de las variables cada 15 minutos desde las 11:00 horas del 27 de enero hasta las 21:00 horas del 8 de febrero de 2017 (zona horaria: UTC – 3).

Finalmente, los datos instantáneos registrados son llevados a medias horarias, de modo que el valor correspondiente a cada hora represente el valor promedio de los 60 minutos precedentes a la hora indicada.

3.2.1. Calibración y precisión instrumental

La medición empírica de series temporales de variables higrotérmicas se realizó mediante *dataloggers* autónomos de la serie Gemini Data Loggers Tinytag Plus [49], [50]. Se dispuso de equipos diferenciados para temperatura y humedad en cada punto de monitoreo:

1. **Temperatura**: Se utilizaron registradores monocanal modelo TG12-0017, equipados con termistor NTC [49].
2. **Humedad Relativa**: Se utilizaron registradores modelo TGP-0304 con sensor capacitivo polimérico [50].

Según las especificaciones técnicas del fabricante, estos sensores presentan las siguientes precisiones en el rango de operación de oficinas (0 a 50 °C) [49], [50]:

- **Temperatura** (TG12-0017): ±0,2 °C (Resolución instrumental: 0,03 °C).
- **Humedad Relativa** (TGP-0304): ±3,0 %HR a 25 °C (Resolución instrumental: 0,5 %HR).

Aunque la resolución intrínseca del hardware es de 0,03 °C y 0,5 %HR, respectivamente, los datos fueron exportados con resolución de 0,01 °C y 0,1 %HR, sin que ello implique una mejora de la precisión instrumental.

Asumiendo que los instrumentos operaron dentro de las condiciones definidas por el fabricante, las precisiones declaradas se adoptaron como referencia cualitativa

de la incertidumbre instrumental para sustentar la validación empírica y la definición de condiciones de frontera del modelo de simulación dinámica.

3.2.2. Instalación de instrumentos

Los registradores se fijaron a media altura para capturar temperaturas representativas y mitigar el sesgo por estratificación térmica, exceptuando los del entrepiso (ubicados sobre el cielo falso) y laboratorio (ubicados sobre una superficie horizontal). Con el fin de eliminar interferencias térmicas por radiación solar o conducción desde la estructura, cada equipo se resguardó en una caseta delgada y opaca. Su diseño abierto en los extremos asegura la convección natural mientras aísla al sensor de fuentes radiativas. Finalmente, se utilizó cartón corrugado multicapa en los apoyos para lograr un desacoplamiento térmico efectivo entre el registrador y su superficie de contacto.



Figura 3.4 Caseta con registradores - segunda oficina

La Figura 3.4 muestra un punto de medición con la caseta protegiendo los registradores de datos de la radiación solar.

3.3. Condiciones ambientales

Las condiciones térmicas y radiativas del ambiente exterior —específicamente temperatura de bulbo seco, humedad relativa y radiación solar global y difusa horizontal— se obtienen a partir de estaciones de monitoreo ubicadas en la cuenca de Santiago.

3.3.1. Estaciones de monitoreo

Las estaciones elegidas como fuentes de datos son el Laboratorio de Óptica y Ambiente de la USACH [47] y la estación Cerro Calán (DAS) [48].

Laboratorio de Óptica y Ambiente – USACH

Este laboratorio registra continuamente datos meteorológicos y de radiación solar, entre otros, y se encuentra a unos 9 [km] hacia el noroeste del edificio, en una zona de condiciones climáticas muy similares (Estación Central). Sin embargo, no ha registrado datos de radiación en el período temporal requerido, por lo que sólo se extraen de aquí la temperatura ambiental y humedad relativa.

Estación Cerro Calán – DAS, Universidad de Chile

La estación Cerro Calán – DAS, perteneciente a la Campaña de Medición del Recurso Eólico y Solar del Ministerio de Energía [48], se ubica en el Observatorio Astronómico Nacional (850 msnm, comuna de Las Condes), a unos 13 km del edificio en estudio. Dependiente del Departamento de Astronomía de la Universidad de Chile (DAS), registra promedios de 10 minutos de radiación solar global horizontal y, mediante dos piranómetros en un seguidor solar, la radiación global y difusa sobre un plano normal a los rayos solares (con bloqueo intencional del disco solar para esta última). La radiación directa normal no se mide directamente (requeriría un pirheliómetro), sino que se estima como la diferencia entre ambas mediciones en seguimiento; por ello, en la Figura 3.9 se identifica como "derivada".

3.4. Datos obtenidos

3.4.1. Datos medidos

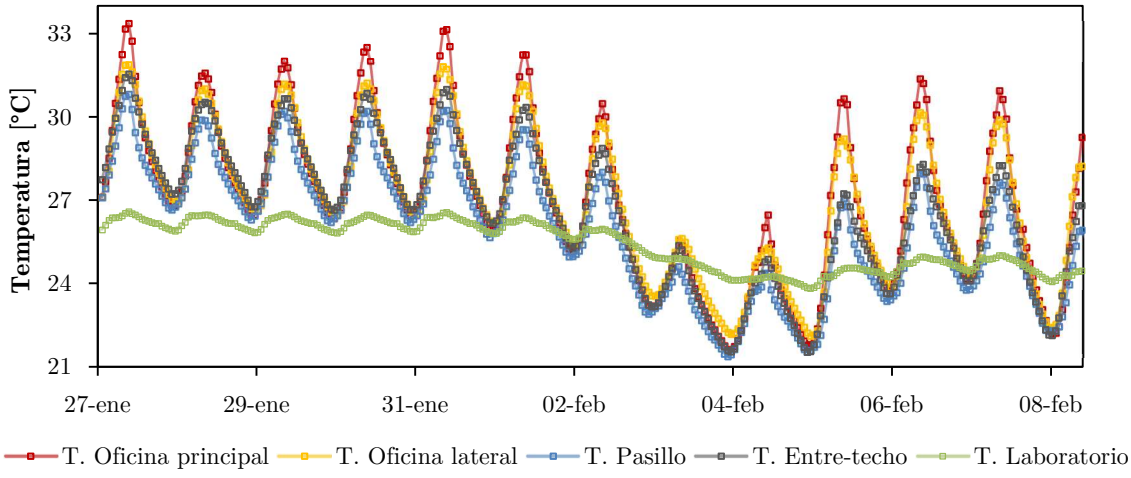


Figura 3.5 Gráfico de temperaturas registradas (media horaria)

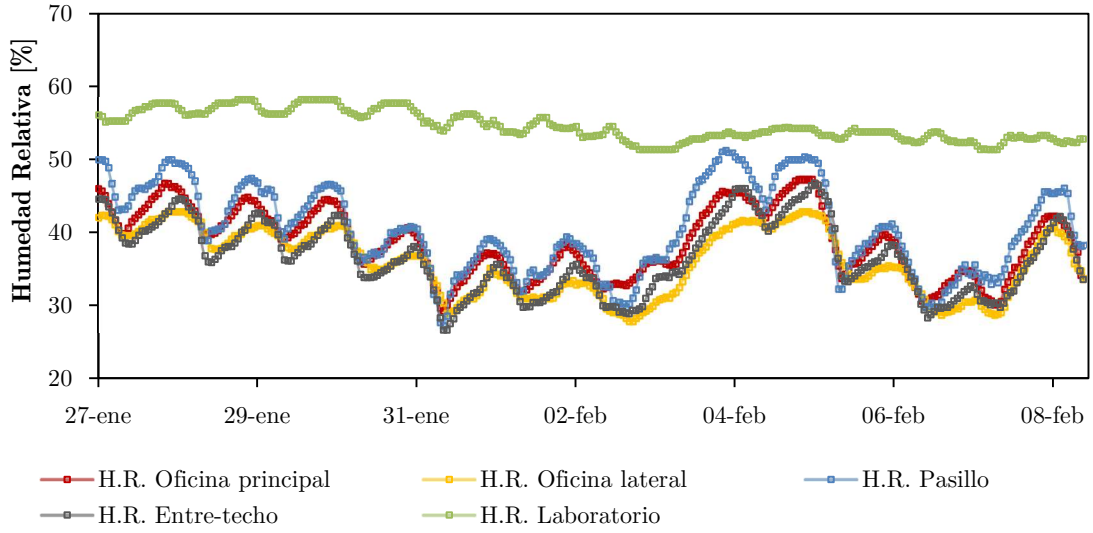


Figura 3.6 Gráfico de humedades relativas (media horaria)

3.4.2. **Datos meteorológicos**

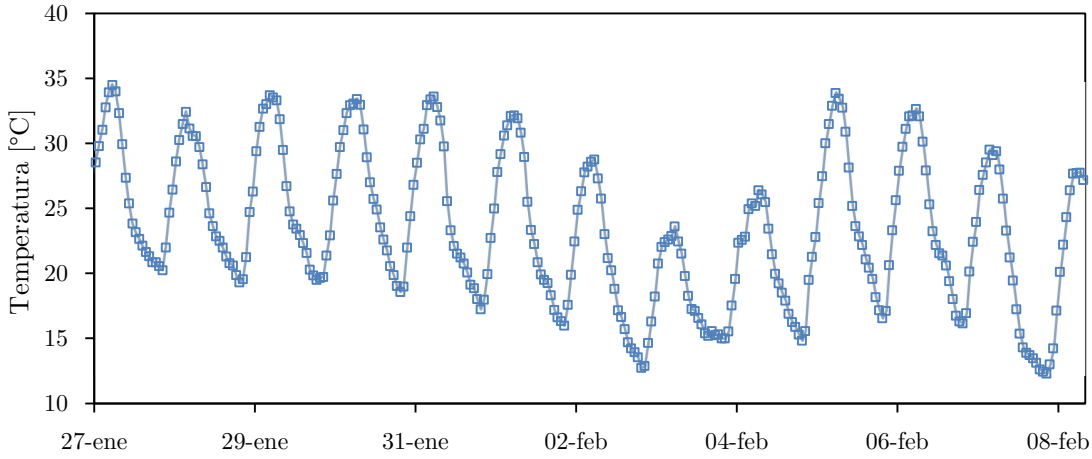


Figura 3.7 Gráfico de temperatura seca del ambiente.
Fuente: Registro USACH [47]

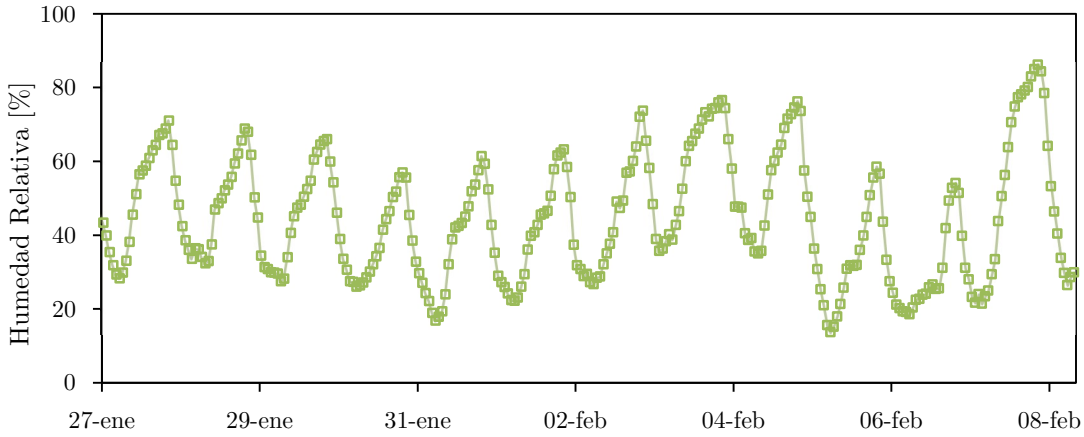


Figura 3.8 Gráfico de humedad relativa del ambiente.
Fuente: Registro USACH [47]

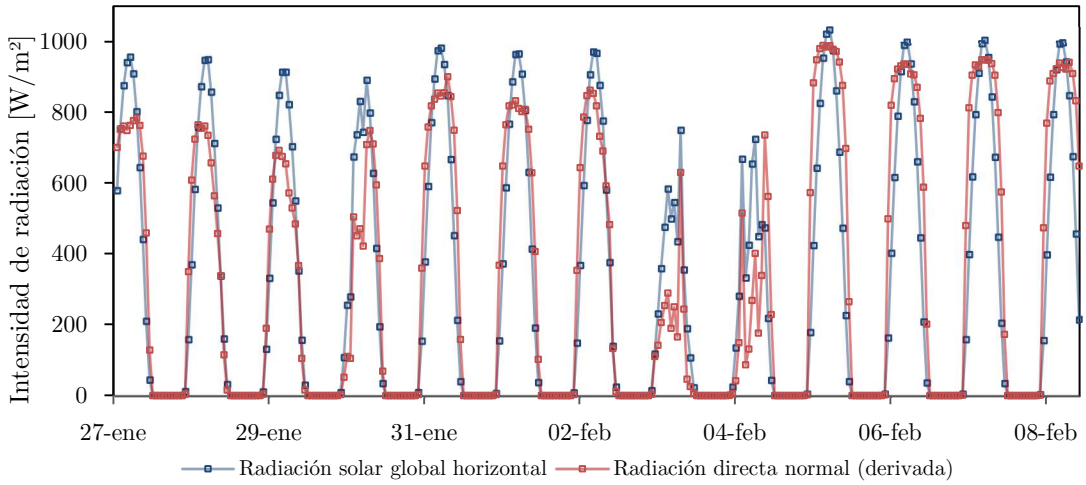


Figura 3.9 Gráfico de Radiación solar global horizontal (medida) y directa normal (derivada) - Fuente: estación Cerro Calán, DAS [48]

CAPÍTULO 4

MODELAMIENTO DEL EDIFICIO

Este capítulo presenta el entorno de simulación empleado y la metodología de modelamiento del edificio. La simulación se realizó en TRNSYS v.17, desarrollado por el Solar Energy Laboratory de la Universidad de Wisconsin-Madison [51].

Se seleccionó esta herramienta por su arquitectura modular y flexible, que resuelve sistemas transitorios mediante la conexión de componentes que representan sistemas físicos a través de modelos independientes (Figura 4.1). Aunque concebida originalmente para sistemas solares térmicos, su desarrollo posterior la consolidó como referencia para la simulación dinámica de edificaciones y la integración de energías renovables [51], junto a programas como EnergyPlus o IDA ICE, reconocidos por su nivel de detalle y flexibilidad para representar sistemas HVAC avanzados [25].

El capítulo se organiza en dos partes. En primer lugar, se presenta el entorno de simulación: una descripción general de la arquitectura de TRNSYS y los fundamentos de cálculo del módulo de modelamiento de edificios (Type 56), sobre los que se apoya el resto del capítulo. En segundo lugar, se expone la metodología implementada para la elaboración del "gemelo digital" del edificio, cubriendo de manera sucesiva la construcción del modelo geométrico 3D y zonificación térmica, la caracterización termofísica de la envolvente en TRNBuild, la definición de las entradas y condiciones de borde dinámicas del modelo, y finalmente la integración de todos estos componentes en el esquema de simulación implementado en Simulation Studio.

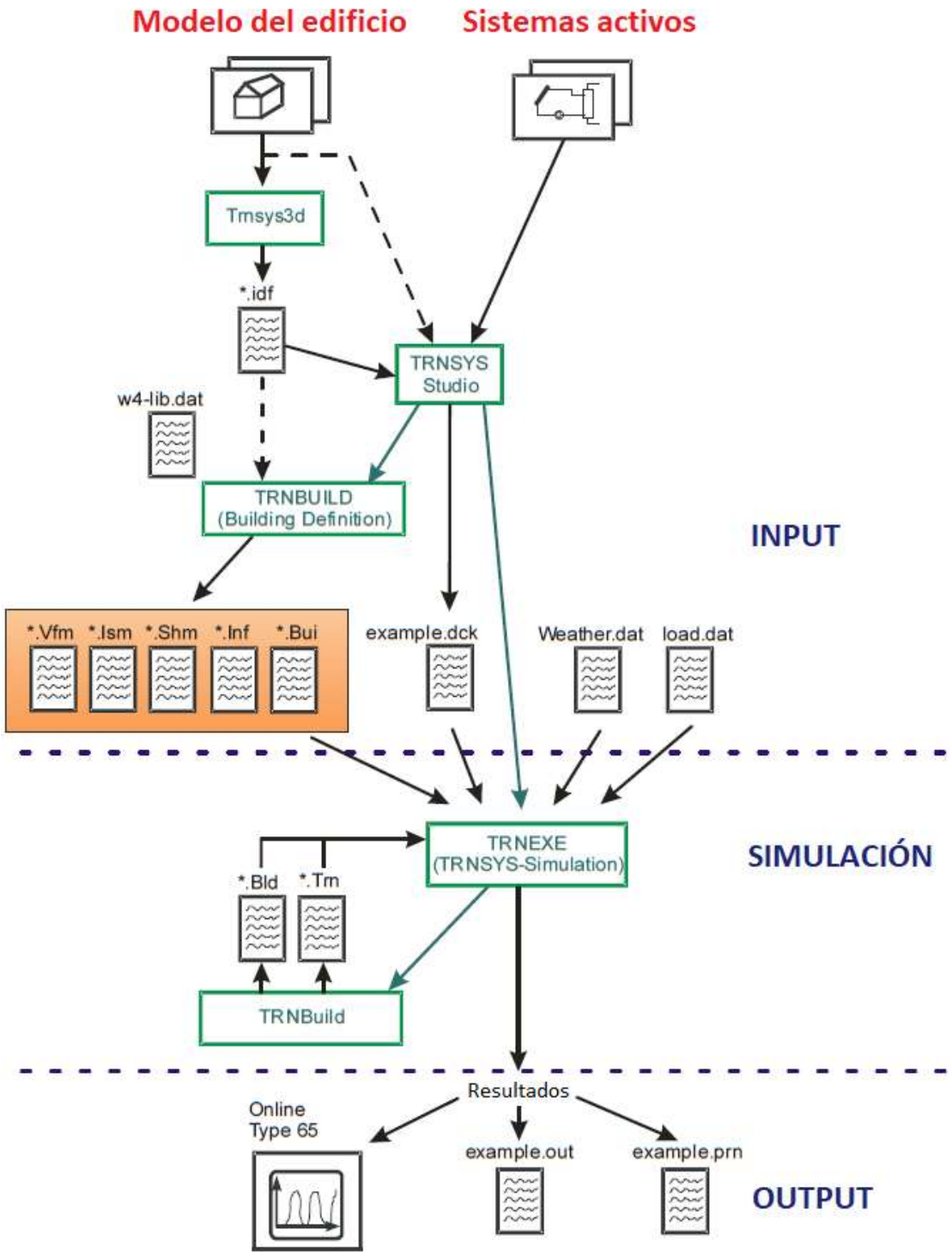


Figura 4.1 Simulación dinámica de edificios en TRNSYS
(Fuente: Manual TRNSYS, Vol.5 [52])

4.1. Entorno y Fundamentos de Simulación — TRNSYS y el Type 56

La arquitectura de TRNSYS se fundamenta en una estructura modular abierta. El programa descompone sistemas energéticos complejos en una serie de componentes individuales denominados *Types*. Cada Type constituye un modelo matemático —una subrutina en código fuente— que describe el comportamiento físico de un elemento del sistema, tal como una bomba, un colector solar o, en este caso, un edificio multizona [51].

El núcleo del programa, denominado *Kernel*, es el motor de cálculo encargado de orquestar la simulación. En cada paso de tiempo (*timestep*), el Kernel llama a los Types definidos en el archivo de entrada (*Deck*), transfiere información entre las entradas (*Inputs*) y salidas (*Outputs*) de los componentes conectados, y resuelve el sistema de ecuaciones algebraicas y diferenciales de manera iterativa hasta alcanzar la convergencia dentro de las tolerancias establecidas [51].

La configuración del sistema, con sus componentes, entradas y salidas, se realiza mediante la interfaz gráfica *Simulation Studio*, donde se interconectan los componentes. Entre los módulos disponibles destaca el Type 56, dedicado al modelamiento de cargas térmicas en edificios. Otros Types permiten modelar bombas de calor, ventiladores, controladores, procesadores climáticos y otros equipos, cada uno de los cuales actúa como un nodo dentro de la red de simulación completa.

4.1.1. Fundamentos de cálculo del Type 56

El modelado térmico del edificio en TRNSYS es llevado a cabo a través del módulo de cargas Type 56, el cual realiza un balance de calor (HBM) para cada zona y cerramientos del inmueble.

Balance de calor de un nodo

El balance de energía sobre un nodo de aire se describe mediante el siguiente balance de flujos de calor [52]:

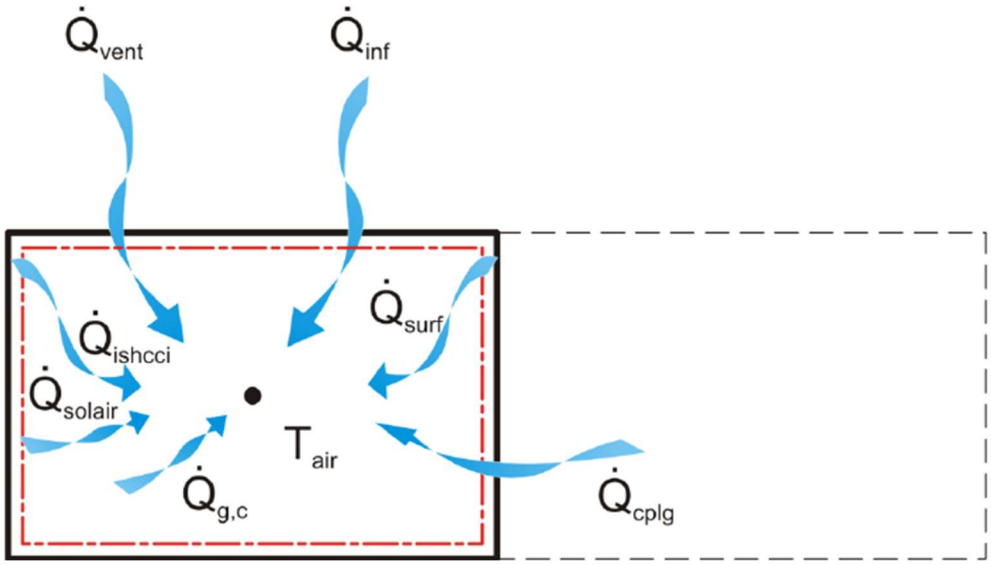


Figura 4.2 Balance de calor sobre nodo de aire
(Fuente: Manual TRNSYS, Vol.5 [52])

$$\dot{Q}_{\text{air}} = \dot{Q}_{\text{surf}} + \dot{Q}_{\text{inf}} + \dot{Q}_{\text{vent}} + \dot{Q}_{\text{g,c}} + \dot{Q}_{\text{cplg}} + \dot{Q}_{\text{solair}} + \dot{Q}_{\text{ISHCC}} \qquad (4.1)$$

La Figura 4.2 grafica el balance correspondiente a la ecuación 4.1 – ver Nomenclatura (página iii).

Flujos de calor en cerramientos

La dinámica de transferencia de calor a través de los límites físicos de cada zona se ilustra en la Figura 4.3, donde se detallan los flujos conductivos, convectivos y radiativos que interactúan en las superficies internas y externas.

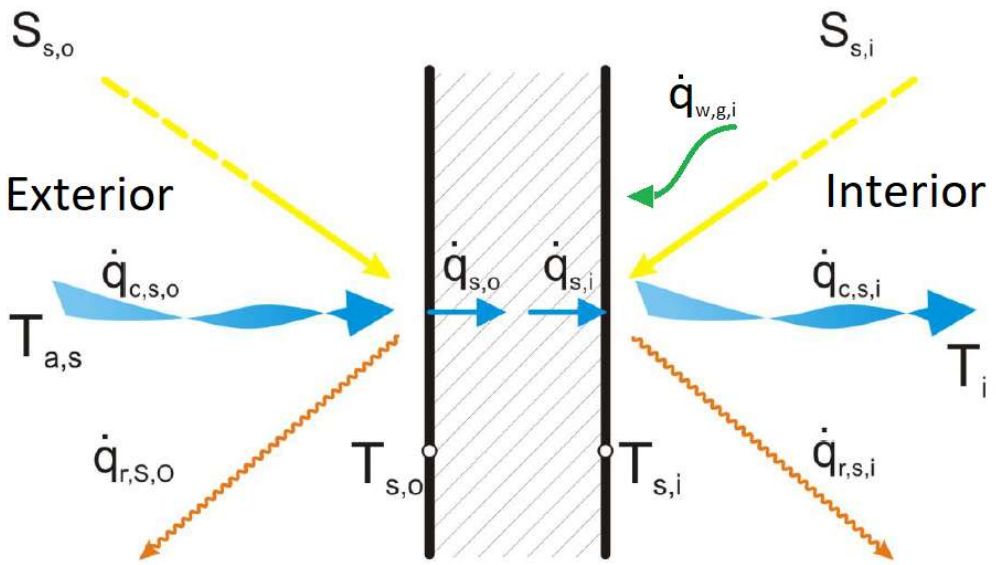


Figura 4.3 Flujos de calor y temperaturas de superficies
(Fuente: Manual TRNSYS, Vol.5 [52])

Cerramientos Opacos (Muros, Techos y Pisos)

La conducción de calor a través de capas masivas se modela utilizando el Método de Funciones de Transferencia (TFM) desarrollado por Mitalas y Arseneault [52]. A diferencia de un cálculo estacionario, este método permite

capturar la inercia térmica del edificio relacionando el flujo de calor actual con las temperaturas y flujos de calor de pasos de tiempo anteriores.

Matemáticamente, el flujo de calor conductivo entrando ($\dot{q}_{s,\text{in}}$) o saliendo ($\dot{q}_{s,\text{out}}$) de una superficie en el tiempo actual se describe mediante series de tiempo con coeficientes de respuesta (α_k, β_k, γ_k):

$$\dot{q}_{s,x} = \sum_{k=0}^{n_\alpha} \alpha_k T_{s,\text{out}_k} - \sum_{k=0}^{n_\beta} \beta_k T_{s,\text{in}_k} - \sum_{k=1}^{n_\gamma} \gamma_k \dot{q}_{s,x_k} \tag{4.2}$$

Donde:

- $T_{s,\text{out}}$ y $T_{s,\text{in}}$: Temperaturas superficiales exterior e interior
- α_k, β_k, γ_k: Coeficientes de la función de transferencia calculados por TRNBuild en función de las propiedades termofísicas (conductividad, densidad, calor específico) y el espesor de cada capa material del muro [52].

De esta forma, el cerramiento actúa como una "caja negra" dinámica que almacena y libera energía con un desfase temporal y amortiguamiento característico, sin necesidad de resolver la ecuación de difusión de calor en cada nodo interno de la pared en cada paso de tiempo.

Cerramientos Acristalados (Ventanas)

Para los elementos vidriados, el Type 56 emplea un modelo óptico y térmico detallado basado en las propiedades calculadas por el software WINDOW 4.1. Desde la perspectiva del balance de energía conductiva, el vidrio se considera un elemento sin masa térmica (capacitancia despreciable), por lo que la transmisión de calor por conducción se resuelve instantáneamente en función

de la diferencia de temperaturas entre las caras y la resistencia térmica del acristalamiento ($1/U_g$), ajustada por los coeficientes de película y correcciones de borde [52]. Sin embargo, el modelo sí calcula iterativamente las temperaturas de cada panel de vidrio considerando la absorción de radiación solar en cada capa.

Finalmente, tal como se observa en la Figura 4.3, el balance de energía en la superficie interior de cualquier cerramiento (opaco o vidriado) acopla la conducción con [52]:

1. **Convección** ($\dot{q}_{c,s,i}$): Calculada según la diferencia de temperatura entre la superficie y el aire del nodo, utilizando coeficientes de transferencia de calor (h) que pueden ser constantes o dependientes del régimen de flujo (definidos en TRNBuild).
2. **Radiación de Onda Larga** ($\dot{q}_{r,s,i}$): Intercambio neto con las demás superficies de la zona.
3. **Radiación Solar y Ganancias** ($\dot{q}_{w,g,i}$): Fracción de la radiación solar transmitida y ganancias internas radiativas que son absorbidas directamente por la superficie.

Infiltraciones, ventilación y acoplamientos

Las infiltraciones son intercambios de aire con el exterior, mientras que la ventilación es la entrada de aire a una temperatura especificada. Las tasas de infiltración y ventilación se ingresan como renovaciones de aire por hora para cada nodo. El flujo másico ($\dot{m}$) es el producto del flujo volumétrico de aire ($\dot{V}$) y la densidad de éste (ρ). Se asume que cantidades iguales de aire entran y salen del nodo [52].

El intercambio de masa de aire en cada zona térmica se modela mediante tres mecanismos distintos, definidos por el origen del flujo de aire:

1. **Infiltración**: Entrada de aire no controlada proveniente directamente del ambiente exterior (T_{amb}).
2. **Ventilación**: Entrada de aire controlada (mecánica o natural) proveniente de una fuente con temperatura definida (T_{vent}), que puede ser el exterior o un sistema de climatización.
3. **Acoplamiento** (*Coupling*): Flujo de aire proveniente de una zona térmica adyacente (T_{adj}).

En el Type 56, estos flujos se ingresan habitualmente como tasas de renovación de aire por hora (ren/h o ACH). El programa asume un equilibrio de masa instantáneo, donde la misma cantidad de aire que ingresa sale del nodo a la temperatura actual de la zona (T_{air}), sin considerar efectos de presurización en este nivel de modelamiento [52]. Es importante notar que TRNSYS no realiza una verificación automática del balance de masa de aire a nivel de edificio completo; la coherencia del acoplamiento entre zonas adyacentes (definiendo el flujo de retorno correspondiente en cada zona) es responsabilidad del usuario [52].

Los flujos de calor sensible asociados a estos intercambios se calculan según las siguientes ecuaciones:

Infiltración:

$$\dot{Q}_{\text{inf}} = \dot{m}_{\text{inf}} \cdot c_p \cdot (T_{\text{amb}} - T_{\text{air}}) \tag{4.3}$$

Ventilación:

$$\dot{Q}_{\text{vent}} = \sum_{\text{ventilaciones}} \dot{m}_{\text{vent_k}} \cdot c_p \cdot \left(T_{\text{vent_k}} - T_{\text{air}}\right) \tag{4.4}$$

Acoplamiento (*Coupling*)**:**

$$\dot{Q}_{\text{cplg}} = \sum_{\text{nodos}} \dot{m}_{\text{nodo_k}} \cdot c_p \cdot \left(T_{\text{nodo_k}} - T_{\text{air}}\right) \tag{4.5}$$

Donde el flujo másico ($\dot{m}$) es el producto del flujo volumétrico de aire ($\dot{V}$) y la densidad de éste (ρ). Finalmente, el impacto en la carga latente se calcula por separado mediante un balance de humedad en el nodo de aire, considerando la diferencia de humedad específica (ω) entre el aire entrante y el aire de la zona [52].

Ganancias internas

Las cargas térmicas generadas al interior de cada zona (ocupación, iluminación artificial y equipamiento) se definen en el Type 56 mediante una potencia total y su descomposición en tres fracciones: sensible convectiva, sensible radiativa y latente (humedad).

El flujo de calor convectivo ($\dot{Q}_{g,c}$) se incorpora instantáneamente al balance de energía del nodo de aire (véase ecuación 4.1), afectando la temperatura de la zona sin retardo [52].

Por el contrario, el flujo de calor radiante ($\dot{q}_{w,g,i}$) no calienta el aire directamente, sino que es absorbido por las superficies interiores de los

cerramientos (muros, techos, pisos y ventanas). En el modelo estándar de TRNSYS, esta energía se distribuye entre las superficies de la zona de manera proporcional a su área y absortividad (*area-weighted*), pasando a formar parte del balance de energía superficial (mostrado en la Figura 4.3). Posteriormente, esta energía almacenada se transfiere al aire mediante convección superficial diferida en el tiempo [52].

Finalmente, la ganancia latente se introduce como un flujo másico de vapor de agua ($\dot{W}_g$) en la ecuación diferencial de balance de humedad del aire, impactando la humedad relativa de la zona, pero no su temperatura seca directa.

Radiación térmica – modelos

El Type 56 permite seleccionar diferentes niveles de detalle para el modelamiento de los intercambios radiativos, tanto para el espectro infrarrojo (onda larga) como para el espectro solar (onda corta) [52].

Radiación de onda larga

Para el intercambio de calor entre las superficies interiores de una zona, el modelo estándar utiliza la aproximación de Red en Estrella (*Star Network*). Este método introduce un nodo de temperatura artificial (T_{star}) que actúa como un punto de potencial medio. Esto permite simplificar el cálculo considerando un flujo de energía paralelo desde la superficie: una vía por convección hacia el nodo de aire y otra vía radiativa hacia el nodo estrella, utilizando resistencias equivalentes ponderadas por área [52].

Por otro lado, el modelo detallado implementa el Método de Gebhart [52]. Este enfoque trata los flujos convectivos y radiativos de forma independiente, resolviendo una matriz de intercambio radiativo basada en factores de visión (*View Factors*) y las propiedades de emisividad de las superficies grises y difusas, lo que permite evaluar el intercambio directo y las reflexiones múltiples entre todas las superficies del recinto.

Ambos métodos de cálculo se ilustran en la Figura 4.4:

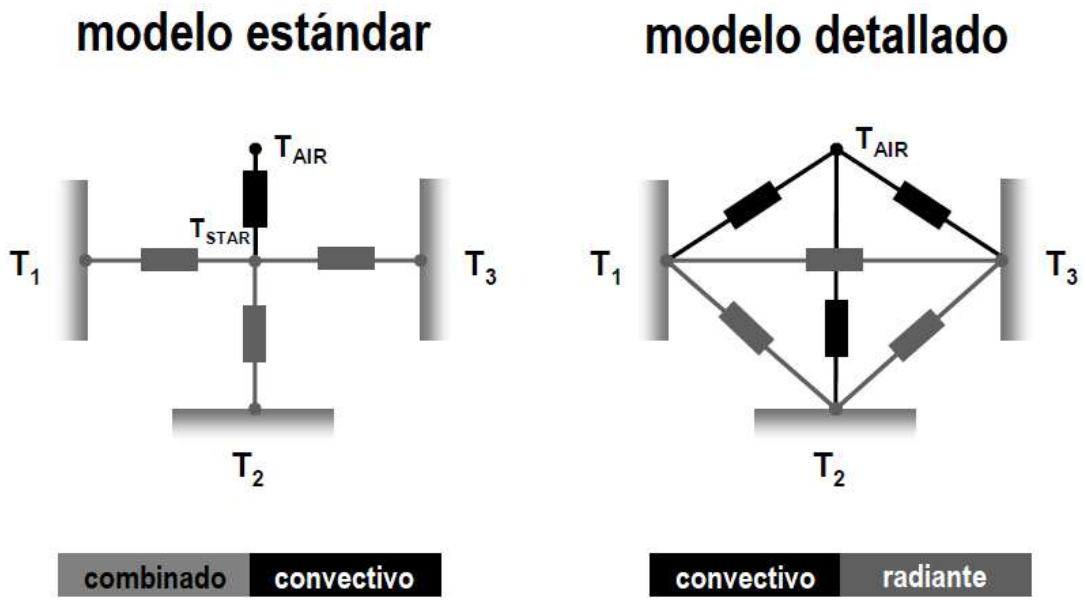


Figura 4.4 Modelos de radiación de onda larga; zona con tres superficies
(Fuente: Manual TRNSYS, Vol.5 [52])

Radiación solar entrante

El tratamiento de la radiación solar que ingresa a la zona también varía según el modo seleccionado [52]:

- **Radiación Directa**: En el modo estándar, la radiación directa que ingresa se distribuye en las superficies interiores según coeficientes definidos manualmente por el usuario, denominados factores *GEOSURF*. El modo detallado, en cambio, utiliza Matrices de Insolación generadas previamente por la herramienta TRNSHD, las cuales determinan geométricamente qué fracción de sol incide en cada superficie (manchas solares) dependiendo de la posición del sol.
- **Radiación Difusa**: El modelo estándar distribuye la radiación difusa basándose en relaciones de área ponderadas por la absortancia de las superficies. El modelo detallado utiliza factores de *Gebhart* para calcular la distribución de la radiación difusa y sus múltiples reflexiones internas.

Por otra parte, una fracción de la radiación solar transmitida por las ventanas exteriores no alcanza las superficies de la envolvente, sino que es absorbida por elementos de baja capacidad térmica —mobiliario, cortinas, equipos— que la ceden casi de inmediato al aire. TRNSYS representa este efecto mediante el factor solar al aire (*solar to air factor*: SF): la fracción de la radiación solar que ingresa por las ventanas exteriores de un nodo de aire y se transfiere inmediatamente como ganancia convectiva al aire interior ($\dot{Q}_{\mathbf{solar}}$) [52]. No debe confundirse con el factor solar de un acristalamiento (SHGC), que es la fracción de la radiación incidente que atraviesa la ventana.

Balance de humedad

Paralelamente al cálculo de energía sensible, el Type 56 resuelve el balance de masa de agua para determinar la evolución de la humedad relativa y la carga latente de cada zona. El software ofrece dos aproximaciones para simular la inercia higrométrica (la capacidad de los materiales para amortiguar cambios de humedad mediante adsorción y desorción): el modelo de capacitancia efectiva y el modelo de almacenamiento en buffer.

Modelo de capacitancia efectiva de humedad

Este es el modelo estándar y el seleccionado para esta investigación. Simula el efecto regulador de humedad de los elementos del recinto (muebles, libros, revestimientos) aumentando virtualmente la masa de aire seco de la zona (M_{air}) mediante un factor multiplicador adimensional ($Ratio$), usualmente entre 1 y 10. La masa efectiva (M_{eff}) se define como [52]:

$$M_{\text{eff}} = Ratio \cdot M_{\text{air}} \tag{4.6}$$

El balance dinámico de humedad en el nodo de aire se resuelve mediante la siguiente ecuación diferencial, que integra los aportes por flujos de aire y ganancias internas:

$$M_{\text{eff}} \frac{d\omega_i}{dt} = \dot{m}_{\text{inf}}(\omega_a - \omega_i) + \sum_{\text{vent}} \dot{m}_{\text{vent_k}}(\omega_{\text{vent_k}} - \omega_i) + \dot{W}_g + \sum_{\text{nodos}} \dot{m}_{\text{nodo_k}}(\omega_{\text{adj_k}} - \omega_i) \tag{4.7}$$

Donde ω representa la humedad específica (kg agua/kg aire seco) de la zona (i), ambiente (a), ventilación (vent) y zonas adyacentes (adj). El término $\dot{W}_g$ representa la tasa de generación interna de humedad (por ejemplo, respiración de ocupantes).

Finalmente, el flujo de calor latente ($\dot{Q}_{\text{lat}}$) asociado a la variación de humedad o a la energía requerida para mantener un setpoint (humidificación o deshumidificación) se calcula en función de la entalpía de vaporización del agua (h_v):

$$\dot{Q}_{\text{lat}} = h_v \cdot M_{\text{eff}} \cdot \frac{\Delta\omega_i}{\Delta t} \tag{4.8}$$

Modelo de amortiguación por almacenamiento de humedad

Este modelo avanzado (*Buffer Storage Humidity Model*) ofrece una representación física más detallada, dividiendo la capacidad higroscópica de los cerramientos en un almacenamiento superficial y uno profundo. Requiere la definición de propiedades específicas de los materiales, como el gradiente de la curva de sorción isotérmica (κ) y los coeficientes de intercambio de masa (β) entre el aire, la superficie y las capas profundas del muro [52].

4.2. Metodología de Modelamiento del Edificio

4.2.1. Modelo Geométrico 3D y Zonificación Térmica

La geometría total del edificio se ingresa a través de Trnsys3d, un complemento (*plugin*) para el software de modelado 3D: Google SketchUp. Esta herramienta permite traducir la arquitectura física-material en un modelo térmico compatible con TRNSYS, generando un archivo de transferencia de extensión .IDF que contiene la topología completa del edificio (vértices, superficies, orientaciones y volúmenes) necesaria para el módulo multizona Type 56 [52].

Definición de Superficies y Sombras

El proceso de modelado no busca obtener una representación exacta, sino una abstracción térmica precisa. Como se observa en la Figura 4.5, el edificio se modela mediante superficies planas clasificadas según su función térmica (muro, ventana, techo, suelo) y su condición de borde (exterior, adyacente o terreno).

Un aspecto relevante en este modelo es el tratamiento de la radiación solar. Los elementos del entorno que obstruyen la radiación directa (edificios vecinos o la propia estructura del edificio) se modelaron como "cuerpos de sombra" (*shading objects*), representados en color púrpura en la Figura 4.5. Esta información geométrica es fundamental para que el software genere posteriormente las matrices de sombreado (*shading matrix*) que determinan dinámicamente qué porcentaje de la radiación es bloqueada hora a hora.

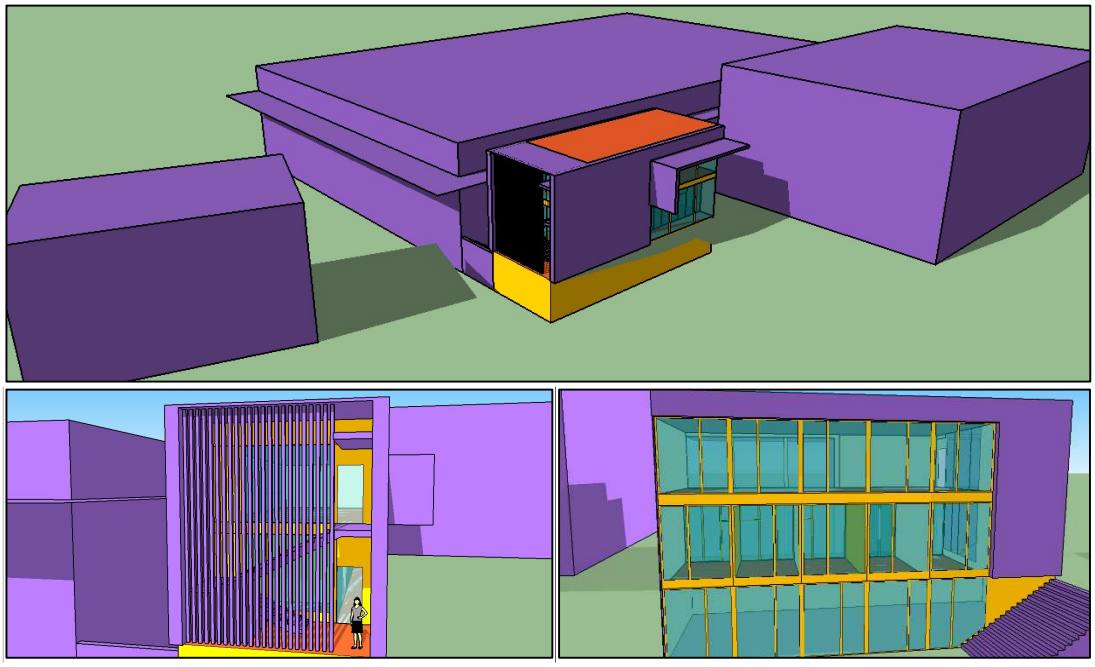


Figura 4.5 Modelo 3D – Google SketchUp
(Fuente: Elaboración propia)

Zonificación Térmica

La discretización del volumen de aire interior resultó en la definición de diez zonas térmicas independientes, cuya estructura jerárquica en la interfaz de TRNBuild se muestra en la Figura 4.6.



Figura 4.6 Zonas térmicas - TRNBuild

La estrategia de zonificación respondió a dos criterios:

1. **Zonas de Interés y Calibración**: Se definieron zonas específicas que coinciden con los espacios instrumentados físicamente (Oficina Principal o *HAB_MODELO*, oficina adyacente, pasillo, laboratorio subterráneo y entrepiso), permitiendo la comparación directa entre simulación y mediciones reales.
2. **Zonas de Borde**: Se modelaron recintos no instrumentados (oficinas no adyacentes, sala de proyectos y zona o plenum superior) para establecer condiciones de contorno dinámicas y realistas, evitando el uso de temperaturas fijas en las paredes divisorias y capturando la inercia térmica global del edificio.

Finalmente, las dimensiones del modelo se obtuvieron directamente de los planos de arquitectura (ver Anexo B) y mediciones *in situ*, mientras que las obstrucciones lejanas se estimaron geométricamente. El archivo .IDF resultante se importó al entorno Simulation Studio mediante el asistente de edificios 3D, vinculando la geometría con los parámetros no geométricos definidos en TRNBuild.

4.2.2. Caracterización Termofísica de la Envolvente — TRNBuild

La definición de las propiedades termofísicas de la envolvente se realizó mediante el módulo TRNBuild. La estructura de datos de este programa se organiza jerárquicamente: primero se definen las propiedades de los materiales individuales (*Layers*) y posteriormente se componen los cerramientos (*Wall Types*) mediante la superposición de estas capas, desde la superficie interior hacia la exterior [52].

Este enfoque permite al Type 56 calcular la respuesta dinámica de la envolvente, considerando explícitamente la masa térmica y la posición del aislamiento dentro de cada cerramiento.

Cerramientos opacos

Dado que no se dispuso de especificaciones constructivas detalladas del inmueble, los elementos opacos del edificio (muros exteriores, tabiques, losas y cubiertas) se modelaron como componentes multicapa (ver Tabla 4.1). La composición detallada de estos elementos y sus propiedades térmicas resultantes se presentan en la Tabla C.1 (ver Anexo C).

Tabla 4.1 Tipos de cerramientos opacos elaborados en TRNBuild

Elemento constructivo	**Espesor, e** [mm]	**Transmitancia, U** [W/m²K]
Cerramiento exterior estructural	300	0,565
Cerramiento exterior simple	210	0,604
Cerramiento exterior no enlucido	190	0,689
Cielo falso	20	1,698
División aislada entre plantas	400	0,318
Muro aislado en contacto con terreno	260	0,133
Suelo aislado en contacto con terreno	250	0,133
Suelo aislado planta superior	10	0,108
Tabiquería exterior	100	0,637
Tabiquería interior	90	0,569
Techo aislado	120	0,356

Es fundamental aclarar que las transmitancias térmicas (Valores-U) presentadas en la Tabla 4.1 son valores referenciales calculados por TRNBuild bajo condiciones de estado estacionario. Para este cálculo estándar, el software asume coeficientes de transferencia de calor combinados (convección + radiación) constantes para las superficies [52]:

- Superficie Interior: $h_{\text{combinado_in}} = 7{,}7\ [\text{W/m}^2\text{K}]$
- Superficie Exterior: $h_{\text{combinado_out}} = 25\ [\text{W/m}^2\text{K}]$

Sin embargo, tal como se describió en la sección de Flujos de calor en cerramientos, durante la simulación dinámica el Type 56 no utiliza este valor U estático, sino el método de Funciones de Transferencia (TFM) para resolver la conducción a través de las capas de la envolvente.

Propiedades Superficiales (Radiación)

El intercambio de energía por radiación depende de las propiedades ópticas de las capas superficiales de los cerramientos. En la Tabla 4.2 se detallan los valores de absortividad solar (α_s), que determinan la ganancia de calor por radiación de onda corta (sol), y la emisividad térmica (ε), que regula el intercambio de radiación de onda larga con el cielo y las superficies circundantes.

Tabla 4.2 Propiedades superficiales de los materiales utilizados

Descripción/composición	**Absortividad solar,** α_s	**Emisividad a** 300 [K], ε
Aluminio anodizado	0,15	0,85
Madera o concreto	0,60	0,90
Superficies blancas	0,20	0,90
Superficies oscuras	0,90	0,90

Coeficientes de Convección

Para el cálculo del intercambio de calor convectivo ($\dot{q}_{c,s}$), se definieron coeficientes de transferencia de calor por convección (h) específicos para cada orientación y condición de exposición, tal como se resume en la Tabla 4.3. A diferencia de los coeficientes combinados de referencia mencionados anteriormente, estos valores de la Tabla 4.3 representan únicamente el fenómeno convectivo y son los que interactúan en el balance de energía del nodo de aire en cada paso de tiempo.

Tabla 4.3 Coeficientes de transferencia de calor por convección aplicados

Tipo de superficie	**Coeficiente de convección, h** [W/m²K]
Superficie horizontal exterior	20,28
Superficie interior (vertical u horizontal)	3,06
Superficie vertical exterior	17,78

Cerramientos acristalados

La modelación de los elementos translúcidos en el Type 56 se basa en un modelo óptico y térmico detallado. Las propiedades de los vidrios seleccionados, presentadas en la Tabla 4.4, provienen de la biblioteca estándar de TRNBuild, la cual integra datos generados por el software WINDOW 4.1 del Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) [52].

Tabla 4.4 Características de cerramientos acristalados

Elemento acristalado	**Diseño** [mm]	**U total** [W/m²K]	SHGC **vidrio**	**τ luz visible**	FM	**R marco** [m²K/W]
Cerramiento doble exterior	4/16/4	1,08	0,499	0,758	0,00	–
Cerramiento simple interior	5	5,64	0,907	0,915	0,05	0,44
Ventanales y ventanas exteriores	6	5,61	0,905	0,914	0,13	0,44

Es importante destacar que el comportamiento térmico de la ventana no se simula como una simple resistencia térmica fija. El modelo calcula iterativamente el balance de energía en cada panel de vidrio, considerando [52]:

1. **Modelo Óptico Angular**: La transmisión (τ) y absorción (α) de la radiación solar directa se recalculan en cada paso de tiempo en función

del ángulo de incidencia del sol, interpolando los datos generados por WINDOW 4.1 en incrementos de 10°. Para la radiación difusa, en cambio, estas mismas propiedades se obtienen mediante integración hemisférica completa, calculada previamente por WINDOW 4.1 e incorporada a la librería de acristalamientos [52].

2. **Modelo Térmico de Nodos**: Se resuelve una red de resistencias que incluye la conducción a través del vidrio, la convección en la cámara de gas (si existe doble panel) y el intercambio de radiación de onda larga entre los paneles.
3. **Marco** (*Frame*): El efecto del marco se incorpora reduciendo el área efectiva de captación solar según el factor FM (fracción de marco) indicado en la Tabla 4.4, y añadiendo una pérdida conductiva paralela basada en el valor U_{frame} definido por el usuario.

Tasas de infiltración - renovación de aire

Las tasas de infiltración de aire se modelan en el TRNBuild mediante una tasa de renovación volumétrica (ren/h) [52]. Ante la ausencia de datos de viento en la fachada, ni ensayos de presurización (*Blower Door*), se adoptaron las tasas fijas de infiltración efectiva obtenidas del proceso de pre-calibración experimental, lo cual corresponde a una limitación del modelo a ser considerada.

Los valores definidos para la posterior calibración de cada zona térmica se presentan a continuación:

Tabla 4.5 Tasas de infiltración usadas en el modelo

Renovaciones de aire por hora [ren/h]
0,004
0,050
0,100
0,250
0,500

Las tasas adoptadas (≤0,5 [ren/h]) describen físicamente a un edificio con un alto nivel de hermeticidad, consistente con la calidad constructiva de los marcos de aluminio y sellos de la oficina operando en régimen de ventanas cerradas. Esta configuración define una renovación de aire mínima, validando al modelo como representativo del comportamiento estanco observado durante el periodo de monitoreo.

Definición de cargas y ganancias internas

Las cargas térmicas generadas al interior del recinto se modelaron utilizando el tipo de objeto GAINS en TRNBuild [52]. Este objeto permite definir no solo la potencia total sensible y latente, sino también la fracción de energía que se emite por convección y la que se emite por radiación.

Esta distinción es esencial para la simulación dinámica:

- La parte convectiva se incorpora inmediatamente al balance de energía del nodo de aire, elevando la temperatura de la zona instantáneamente.

- La parte radiativa es absorbida por las superficies interiores (muros, piso, techo) y se libera al aire con un retardo temporal, contribuyendo a la inercia térmica del edificio.

Se configuraron dos escenarios operativos:

1. **Escenario de Calibración**: Se definieron ganancias nulas (0 [W]) para replicar las condiciones del edificio desocupado durante la campaña de monitoreo.
2. **Escenario de Evaluación**: Se definieron las cargas de una oficina operativa estándar según los valores de la Tabla 4.6. Se consideró una ocupación sedentaria (actividad de oficina según ISO 7730) y equipamiento típico, aplicando los perfiles horarios de uso definidos mediante *Schedules* en TRNSYS.

Los parámetros de carga para los horarios de operación definidos para la posterior simulación del sistema a evaluar se detallan en la Tabla 4.6:

Tabla 4.6 Ganancias internas consideradas

Tipo de ganancia	**Potencia de calor liberado** [W]
Persona en labores de oficina	150
Computador portátil	50
Iluminación (lámparas de escritorio)	~15

4.2.3. **Entradas del módulo de cargas**

Para resolver el balance térmico en cada paso de tiempo, el Type 56 requiere condiciones de borde dinámicas que son suministradas por otros componentes

a través de sus Entradas (*Inputs*). Es fundamental distinguir estas entradas de los Parámetros definidos previamente en TRNBuild:

- **Parámetros**: Son valores constantes que definen las propiedades físicas invariables del edificio (áreas, espesores, conductividades, capacitancias) y se fijan antes de iniciar la simulación.
- **Entradas** (*Inputs*): Son variables dependientes del tiempo (*forcing functions*) que conectan al edificio con el entorno meteorológico, el suelo y los sistemas activos, actualizándose en cada *timestep* de la simulación.

Tabla 4.7 Inputs principales del Type 56

INPUT	**Unidad**
Humedad relativa del ambiente	[%]
Temperatura seca del ambiente	[°C]
Temperatura efectiva del cielo	[°C]
Temperatura del suelo a profundidad (opcional)	[°C]
Ángulo cenital del Sol	[deg]
Ángulo azimut del Sol	[deg]

La cantidad y tipo de entradas dependen de los modelos de radiación y convección seleccionados. La Tabla 4.7 resume las entradas climáticas estándar requeridas para el balance de energía básico. Por otro lado, dado que este estudio utiliza el modo de cálculo detallado de radiación solar (basado en la geometría 3D importada de SketchUp), se requieren entradas adicionales para cada orientación definida, las cuales se detallan en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8 Inputs adicionales para geometría 3D

INPUT	Unidad
Ángulo de incidencia solar para cada orientación definida	[rad]
Radiación total incidente para cada orientación definida	[kJ/m²hr]
Radiación solar directa para cada orientación definida	[kJ/m²hr]

Estas variables actúan como las condiciones de contorno que excitan el sistema, permitiendo simular la respuesta dinámica del edificio.

Temperatura ambiente y psicrometría

El estado termodinámico del aire exterior es la principal perturbación que afecta al edificio. Dependiendo del objetivo de la simulación (calibración o evaluación), estos datos se gestionan mediante dos componentes distintos:

1. **Escenario de Calibración** (Datos Reales): Se emplea el Type 9 (Lector de datos [51]), un componente genérico diseñado para leer archivos de texto con los datos experimentales obtenidos durante la campaña de monitoreo *in situ* descrita en el Capítulo 3.
2. **Escenario de Evaluación** (Año Tipo): Se utiliza el Type 15-6 (Procesador de datos de clima [51]) para leer archivos de clima estandarizados (formato .TMY2) de la biblioteca de TRNSYS. Este componente interpola los datos horarios de temperatura seca y humedad relativa, y calcula parámetros derivados como la temperatura efectiva del cielo.

Dado que el balance de humedad en el Type 56 requiere conocer propiedades específicas del aire húmedo que no fueron medidas directamente, se integra el componente Type 33 (*Psychrometrics*). Este módulo recibe como *inputs* la

temperatura de bulbo seco y la humedad relativa (provenientes del Type 15 o Type 9) y calcula, mediante las correlaciones de ASHRAE, propiedades psicrométricas adicionales necesarias para la simulación, tales como la temperatura de saturación o punto de rocío, la humedad absoluta (razón de humedad) y la entalpía específica del aire [51].

Temperatura efectiva del cielo – Type 69

Para el cálculo del intercambio de radiación de onda larga entre las superficies exteriores del edificio y la atmósfera, el Type 56 utiliza una temperatura ficticia de cielo negro (T_{sky}), la cual es determinada por el componente Type 69. Este modelo, basado en las correlaciones de Martin y Berdahl, calcula la temperatura del cielo en función de la temperatura ambiente, la temperatura de rocío, la nubosidad y la presión atmosférica local [51].

Factor de Nubosidad (C_{cover})

Si el archivo climático no proporciona directamente la cobertura de nubes, esta se estima mediante la correlación de Kasten y Czeplak [51], a partir de la relación entre la radiación difusa (G_d) y la radiación global horizontal (G_T):

$$C_{\mathrm{cover}} = \left(1{,}4286 \cdot \frac{G_d}{G_T} - 0{,}3\right)^{0{,}5} \tag{4.9}$$

Para el factor de nubosidad nocturna se usa el promedio respecto de la tarde [51].

Presión Atmosférica (P_z)

La presión atmosférica a la altura barométrica 'z_0' para la ubicación definida es ajustada respecto de la presión atmosférica a nivel del mar (P_o) de acuerdo con la fórmula barométrica, donde ρ_o es la densidad del aire y g la gravedad:

$$P_z = P_o \cdot e^{-\frac{\rho_o \cdot g \cdot z_0}{P_o}} \tag{4.10}$$

Emisividad del cielo despejado (ε_o)

La emisividad del cielo despejado es calculada a partir de la temperatura de saturación (T_{sat}), incluyendo correcciones por la hora del día (hora) y la presión local. A diferencia de la temperatura seca utilizada en modelos simplificados, el Type 69 utiliza $\mathrm{T_{sat}}$ para representar mejor la concentración de vapor de agua en la atmósfera [51]:

$$\varepsilon_o = 0{,}711 + 0{,}005T_{\text{sat}} + 7{,}3 \cdot 10^{-5}{T_{\text{sat}}}^2 + 0{,}013\cos\left(2\pi\frac{\text{hora}}{24}\right) + 12 \cdot 10^{-5}(P_z - P_o) \tag{4.11}$$

Finalmente, la temperatura efectiva del cielo (T_{sky}) se obtiene integrando el efecto de la nubosidad sobre la emisividad del cielo claro:

$$T_{\text{sky}} = T_{\text{amb}}[\varepsilon_o + 0{,}8(1 - \varepsilon_o)C_{\text{cover}}]^{\,0{,}25} \qquad \text{[K]} \tag{4.12}$$

Temperatura del suelo – Type 77

El acoplamiento térmico con el terreno se modela utilizando el componente Type 77, el cual implementa la correlación de Kusuda & Achenbach, citado en [51]. Este modelo analítico permite calcular la temperatura del suelo (T_{grd}) a una profundidad determinada (d) y en un día específico del año (t), basándose en la temperatura media anual del aire (T_{mean}), la amplitud de su oscilación (T_{amp}) y la inercia térmica del terreno.

Perfil de temperatura del suelo

La temperatura del suelo no perturbado se calcula mediante la siguiente ecuación sinusoidal amortiguada:

$$T_{\text{grd}}(t,d) = T_{\text{mean}} - T_{\text{amp}} \cdot e^{-d\cdot\sqrt{\frac{\pi}{365\cdot\delta_g}}} \cdot \cos\left[\frac{2\pi}{365}\cdot\left(t - t_{\text{mín}} - \frac{d}{2}\cdot\sqrt{\frac{365}{\pi\delta_g}}\right)\right] \quad [\text{K}] \tag{4.13}$$

Donde δ_g es la difusividad térmica del suelo (obtenida a partir de la ecuación 4.14) y $t_{\text{mín}}$ es el día del mínimo anual de temperatura media superficial.

$$\delta_g = \frac{k_g}{\left(\rho c_p\right)_g} \cdot 86.400 \qquad [\text{m}^2/\text{día}] \tag{4.14}$$

Los parámetros de entrada utilizados para configurar el Type 77, correspondientes a las características climáticas de la zona y las propiedades físicas estimadas del suelo, se detallan en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9 Parámetros de entrada del Type 77

INPUT	**Valor**	**Unidad**
Temperatura anual media del aire	14,5	[°C]
Amplitud anual de oscilación de la T° media diaria	6	[°C]
Día anual del mínimo de la curva de T° media diaria	180	[día]
Conductividad térmica del suelo	2	[W/m°C]
Densidad del suelo	2000	[kg/m^3]
Calor específico del suelo	1300	[J/kg°C]

El Type 77 es configurado para calcular la temperatura del suelo a nivel superficial ($T_{\text{grd}}(t, 0)$) y a una profundidad de dos metros ($T_{\text{grd}}(t, 2)$).

Temperatura efectiva del suelo

Finalmente, el Type 56 requiere una temperatura de suelo para el cálculo del intercambio de radiación de onda larga con las superficies exteriores del edificio (*input* TSGRD). Dado que el suelo real no se comporta como un cuerpo negro perfecto ($\varepsilon < 1$) y el modelo de Kusuda & Achenbach, citado en [51], entrega una temperatura diaria (T_{grd}), se define una Temperatura Efectiva del Suelo ($T_{\text{ef,grd}}$) ficticia. Su valor se estimó a partir de la emisividad ($\varepsilon_{\text{grd}} \approx 0{,}94$ [8]) y una temperatura representativa que promedia la temperatura superficial del suelo con la temperatura del aire (T_{amb}) para representar mejor la temperatura radiante del entorno terrestre. Luego, siguiendo la definición de temperatura radiativa equivalente basada en la ley de Stefan–Boltzmann [6]:

$$T_{\text{ef,grd}} = {\varepsilon_{\text{grd}}}^{1/4} \cdot \left(\frac{T_{\text{grd}}(t, 0) + T_{\text{amb}}}{2} \right) \qquad \text{[K]} \qquad (4.15)$$

Esta temperatura efectiva se introduce como *input* en el Type 56, permitiendo que el balance de energía en la fachada considere una condición de borde radiativa más realista.

Radiación solar en planos inclinados

La estimación de la irradiancia solar sobre las superficies de la envolvente (fachadas y cubiertas) es fundamental, ya que los archivos climáticos suelen proporcionar únicamente la radiación medida sobre el plano horizontal. El tratamiento de estos datos en TRNSYS varía según el escenario de simulación:

1. **Escenario de Calibración** (Datos Reales): Se emplean la radiación global horizontal medida y directa normal derivada, provenientes de la estación Cerro Calán (DAS). Estos datos son ingresados mediante el Type 9 (*Data Reader*) y posteriormente procesados por el Type 16 (Procesador de Radiación Solar), que se encarga de proyectar geométricamente la radiación sobre las superficies inclinadas del edificio.
2. **Escenario de Evaluación** (Año Tipo): Se utiliza el Type 15-6 (procesador de datos climáticos) para leer el archivo de año tipo (.TM2). Este componente integra las funciones de lectura y procesamiento, calculando internamente la radiación sobre los planos inclinados sin requerir un procesador externo.

TRNSYS 17 dispone de cinco modos para el manejo de la radiación solar en superficies inclinadas, todos ellos emplean las mismas técnicas para proyectar la radiación directa y la reflejada por el suelo; la diferencia fundamental radica en el tratamiento de la componente difusa, cuya estimación depende del modelo de cielo seleccionado.

Radiación directa

La contribución de la radiación solar directa sobre una superficie inclinada ($G_{D,S}$) se calcula geométricamente proyectando la radiación directa horizontal (G_D) mediante el factor geométrico R_D. Este factor depende del ángulo de incidencia (θ) y el ángulo cenital (θ_z), variables calculadas paso a paso por el procesador de radiación [51]:

$$R_D = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} \tag{4.16}$$

$$G_{D,S} = R_D \cdot G_D \tag{4.17}$$

Radiación reflejada por el suelo

Para la componente reflejada por el entorno, se asume que el suelo actúa como un reflector isotrópico [51]. El factor de visión entre la superficie inclinada y el suelo (R_r) se define en función de la pendiente de la superficie (β) y la reflectividad del suelo (r_g, típicamente 0,2) :

$$R_r = \frac{1-\cos\beta}{2} \cdot r_g \tag{4.18}$$

La radiación reflejada incidente ($G_{g,S}$) resulta del producto de este factor y la radiación global horizontal (G_T) [51]:

$$G_{g,S} = R_r \cdot G_T \tag{4.19}$$

Radiación difusa – Pérez et al.

Para el cálculo de la radiación difusa sobre planos inclinados ($G_{d,S}$), se seleccionó el Modelo de Pérez et al. (1999) [51] (configurado como Modo 5 en Type 15 y 16). Este modelo anisotrópico ofrece mayor precisión que el modelo isotrópico simple, ya que contabiliza tres componentes: la radiación difusa del domo celeste, la radiación circunsolar y el brillo del horizonte.

El modelo se gobierna mediante dos parámetros atmosféricos derivados de los datos de entrada: la claridad del cielo (ε_{sky}) y el brillo del cielo (Δ).

La claridad del cielo (ε_{sky}) clasifica las condiciones desde cielos cubiertos a despejados, dependiendo de la radiación difusa horizontal (G_d) y la directa normal ($G_{D,n}$) [51]:

$$\varepsilon_{\text{sky}} = 1 + \frac{G_{D,n}/G_d}{1 + \kappa \cdot {\theta_z}^3} \tag{4.20}$$

Donde κ es una constante igual a $1{,}041$ para ángulos en radianes, o $5{,}535 \cdot 10^{-6}$ para ángulos en grados.

El brillo del cielo (Δ) cuantifica la opacidad o espesor óptico de las nubes, incorporando la masa de aire relativa (i_{atm}):

$$\Delta = i_{\text{atm}} \cdot \frac{G_d}{G_{\text{solar}}} \tag{4.21}$$

Donde i_{atm} es el índice de masa relativa de la atmósfera, y representa la relación entre la masa de aire que un haz de luz proveniente del Sol atraviesa para llegar a la superficie de la Tierra, y la masa por la cual éste pasaría si el Sol estuviera en el cénit y la superficie a nivel del mar.

A partir de estos parámetros, el modelo determina los coeficientes de brillo reducido ($F'1$ y $F'2$), los cuales ponderan la influencia de la región circunsolar y del horizonte, respectivamente:

$$F'1 = F_{11}(\varepsilon_{\text{sky}}) + F_{12}(\varepsilon_{\text{sky}}) \cdot \Delta + F_{13}(\varepsilon_{\text{sky}}) \cdot \theta_z \tag{4.22}$$

$$F'2 = F_{21}(\varepsilon_{\text{sky}}) + F_{22}(\varepsilon_{\text{sky}}) \cdot \Delta + F_{23}(\varepsilon_{\text{sky}}) \cdot \theta_z \tag{4.23}$$

Los coeficientes empíricos de Pérez (F_{ij}) de las ecuaciones 4.22 y 4.23 son obtenidos de la Tabla D.1 (ver Anexo D), según el rango de claridad del cielo (ε_{sky}) [51].

Adicionalmente, se define el factor geométrico (a/c) que pondera el ángulo sólido ocupado por la región circunsolar en el plano inclinado respecto al horizontal, donde a y c son funciones trigonométricas de los ángulos de incidencia y cenital:

$$\frac{a}{c} = \frac{\max[0, \cos\theta]}{\max[\cos 85°, \cos\theta_z]} \tag{4.24}$$

Finalmente, la radiación difusa sobre la superficie inclinada ($G_{d,S}$) se obtiene integrando estos factores en la ecuación general del modelo de Pérez [51]:

$$G_{d,S} = G_d \cdot \left[(1 - F'1)\left(\frac{1 + \cos\beta}{2}\right) + F'1 \cdot \frac{a}{c} + F'2 \cdot \sin\beta\right] \tag{4.25}$$

La radiación solar total que incide sobre una superficie plana inclinada es la suma de los tres componentes calculados:

$$G_{T,S} = G_{D,S} + G_{d,S} + G_{g,S} \tag{4.26}$$

4.2.4. Implementación y esquema modular: Simulation Studio

La integración de los elementos descritos a lo largo de este capítulo se materializa en el entorno gráfico Simulation Studio. Esta interfaz permite vincular visualmente los componentes lógicos (*Types*), estableciendo el flujo de información que alimenta al edificio en cada paso de tiempo de la simulación.

La arquitectura del proyecto se organizó situando al módulo de cargas (Type 56) como el núcleo del sistema, el cual recibe las condiciones de borde procesadas por los componentes periféricos (radiación, temperatura de cielo, psicrometría) y entrega los resultados de confort y demanda térmica. La topología de conexiones específica utilizada para este estudio se presenta a continuación para el "Modelo de Calibración":

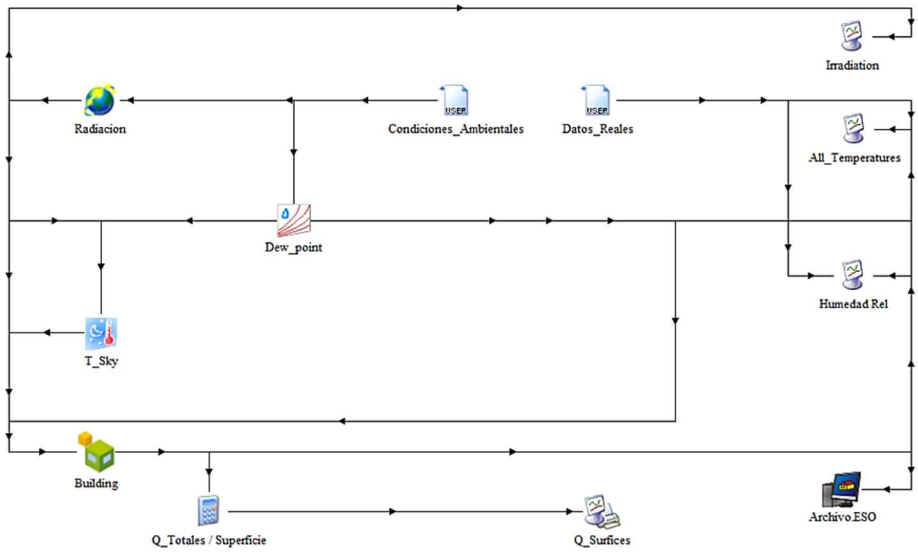


Figura 4.7 Modelo térmico del edificio en TRNSYS – Simulation Studio (Fuente: Elaboración propia)

Modos de Simulación

Los dos esquemas de simulación son diferenciados, principalmente, según la fuente de sus datos de entrada:

1. **Modelo de Calibración** (Datos Experimentales): Esta configuración, ilustrada en la Figura 4.7, tiene por objetivo replicar digitalmente el periodo de monitoreo real. Para ello, se utilizan componentes lectores de datos (Type 9) que inyectan al sistema las mediciones *in situ* de temperatura, humedad y radiación (descritas en el Capítulo 3), forzando a la simulación a responder a las condiciones meteorológicas exactas que ocurrieron durante la ventana de tiempo analizada.
2. **Modelo de Evaluación** (Año Tipo): Una vez validado el modelo físico, se sustituyen los lectores de datos reales por el procesador meteorológico Type 15-6. Este componente alimenta al sistema con archivos climáticos estandarizados (TMY), permitiendo proyectar el desempeño del edificio y del sistema de climatización bajo condiciones representativas de un año típico.

En ambos esquemas, el flujo de información sigue una lógica secuencial: los datos climáticos crudos son pre-procesados para calcular variables derivadas (como la temperatura efectiva del cielo o la humedad absoluta), las cuales actúan como *inputs* dinámicos para el Type 56. Finalmente, las variables de estado resultantes (temperaturas de zona, HR, cargas térmicas) son capturadas mediante componentes de salida, como el Type 65 (*Online Plotter*) para visualización en tiempo real o impresoras de archivo para el post-proceso de datos.

CAPÍTULO 5

CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO TÉRMICO

Este capítulo presenta la aplicación práctica de la metodología de calibración y validación al modelo TRNSYS del edificio en estudio, en tres pasos: un análisis de sensibilidad que determinó las variables de mayor influencia para la calibración, la metodología de ajuste aplicada —métricas de error, ventana de datos y procedimiento de calibración— y los resultados obtenidos en ambas etapas, calibración y validación.

Para llevar a cabo el proceso de calibración y posterior validación del modelo térmico del edificio, se requiere:

- Un modelo inicial o base.
- Un conjunto de entradas a calibrar.
- Datos climáticos locales.
- Mediciones térmicas del edificio.
- Métricas de error.
- Criterios de aceptación.

Ya con el modelo base listo, se procede a realizar un estudio de sensibilidad respecto de los parámetros de entrada del modelo para después definir el conjunto de entradas a calibrar.

5.1. Análisis de sensibilidad

En el contexto de la simulación energética, los parámetros de entrada de un modelo pueden clasificarse según el origen de su incertidumbre en incertidumbre de escenario (condiciones externas impuestas al edificio, como el clima o los perfiles de ocupación) e incertidumbre de especificación (parámetros físicos internos del modelo, como propiedades de materiales o geometría) [26]. El presente análisis se concentra en esta segunda categoría, evaluando la sensibilidad del modelo frente a variaciones en sus parámetros constructivos y operacionales.

5.1.1. Metodología del SA

Para esta investigación, se aplicó un análisis de sensibilidad local mediante el método OAT, fundamentado en los criterios de Hamby, 1994 [53]. Este enfoque consistió en variar 35 parámetros de forma individual para identificar su impacto específico sobre la temperatura (T°) y humedad relativa (HR) en 5 de las 10 zonas del modelo.

Cada parámetro se evaluó en un máximo de dos puntos dentro de un rango acotado (ver Tablas 5.1, 5.2 y 5.3). Los valores de referencia presentados en dichas tablas constituyen la configuración de referencia o línea base, utilizada como contraste para todas las simulaciones del análisis.

A continuación, se muestran las Tablas 5.1, 5.2 y 5.3 con los 35 parámetros utilizados para el Análisis de Sensibilidad.

Tabla 5.1 Parámetros constructivos para SA

Cód.	Parámetro		Unidad	Valor ref.	Lím. inf.	Lím. sup.
A1	Aislante suelo pta. superior		[hm²K/kJ]	5	4	6
A2	Aislante contacto a terreno		[hm²K/kJ]	2	1	3
CSCA	Solado de piedra artificial	Capacitancia	[kJ/kgK]	1,0	0,8	1,2
CSCO		Conductividad	[kJ/hmK]	4,68	4,00	6,00
CSD		Densidad	[kg/m³]	1500	1300	1700
HACA	Hormigón armado	Capacitancia	[kJ/kgK]	1,0	0,8	1,2
HACO		Conductividad	[kJ/hmK]	9	8	10
HAD		Densidad	[kg/m³]	2500	2300	2700
HCCA	Hormigón en masa	Capacitancia	[kJ/kgK]	1,0	0,8	1,2
HCCO		Conductividad	[kJ/hmK]	6,3	5,5	7,0
HCD		Densidad	[kg/m³]	2000	1800	2200
LMCA	Lana mineral	Capacitancia	[kJ/kgK]	0,656	0,600	0,700
LMCO		Conductividad	[kJ/hmK]	0,15	0,13	0,17
LMD		Densidad	[kg/m³]	200	170	230
PPCA	Panel móvil	Capacitancia	[kJ/kgK]	2,0	1,7	2,3
PPCO		Conductividad	[kJ/hmK]	0,306	0,250	0,350
PPD		Densidad	[kg/m³]	540	500	600
PLCA	Revesti-	Capacitancia	[kJ/kgK]	1,6	1,4	1,8
PLCO	miento de	Conductividad	[kJ/hmK]	0,612	0,500	0,700
PLD	madera	Densidad	[kg/m³]	600	550	700
XPCA	Poliestire	Capacitancia	[kJ/kgK]	1,5	1,3	1,7
XPCO	no extrui.	Conductividad	[kJ/hmK]	0,126	0,100	0,200
XPD	(XPS)	Densidad	[kg/m³]	40	35	45
YCCA	Yeso Cartón	Capacitancia	[kJ/kgK]	1,0	0,8	1,2
YCCO		Conductividad	[kJ/hmK]	0,9	0,8	1,0
YCD		Densidad	[kg/m³]	825	800	900

Tabla 5.2 Otros parámetros para SA

Cód.	Parámetro		Unidad	Valor ref.	Lím. inf.	Lím. sup.
ACE	Prop. del aire	Calor esp.	[kJ/kgK]	1,012	0,950	1,050
ADE		Densidad	[kg/m³]	1,204	1,150	1,250
INF	Infiltraciones (por zona)		[ren/h]	-	0,004	0,500
RRD	Ref. suelo para radiación dif.		[-]	0,00	0,00	0,50
RFT	Ref. total del suelo (albedo)		[-]	0,22	0,22	0,30
SF	Fracción solar al aire (por zona)		[-]	-	0	1

Tabla 5.3 Variación del tipo de acristalado para SA

Cód.	Tipo de acristalado	Cód. Ref.	Código 1	Código 2
VD	Ventana de doble panel	14002	3102	15008
VSE	Ventana simple exterior	11011	13903	13906
VSI	Paño simple interior	11010	13903	13906

Para cuantificar la sensibilidad de forma adimensional y permitir una comparación directa entre variables de distinta naturaleza física, se definieron las siguientes dos métricas normalizadas:

1. **Error Absoluto Medio Normalizado** (NMAE): magnitud media de la diferencia entre la serie simulada con el parámetro perturbado ($X_{\mathrm{sim,i}}$) y la serie de referencia ($X_{\mathrm{ref,i}}$), normalizada por el promedio de esta última ($\bar{X}_{\mathrm{ref}}$). En este contexto, no mide un error respecto de mediciones, sino cuánto se aparta la simulación de la condición base; al usar valores absolutos, no distingue si el parámetro aumenta o disminuye la variable.

$$\mathrm{NMAE} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left| X_{\mathrm{sim,i}} - X_{\mathrm{ref,i}} \right|}{n \cdot \bar{X}_{\mathrm{ref}}} \tag{5.1}$$

2. **Variación Relativa de la Desviación Estándar** ($\Delta S_{\%}$): cambio relativo de la desviación estándar de la serie perturbada (S_{sim}) respecto de la de referencia (S_{ref}), ambas calculadas sobre toda la ventana de análisis. Como la variabilidad de estas series está dominada por el ciclo diario, $\Delta S_{\%}$ indica si un parámetro amortigua o amplifica la oscilación (por ejemplo, al modificar la inercia térmica), aunque no detecta desfases temporales: una serie solo desplazada en el tiempo conserva su desviación estándar.

$$\Delta S_{\%} = \frac{|S_{\text{sim}} - S_{\text{ref}}|}{S_{\text{ref}}} \cdot 100\% \tag{5.2}$$

Para el análisis final de resultados, se seleccionó el valor máximo obtenido de cada métrica ante las variaciones de un parámetro, permitiendo clasificar los factores según su "nivel de influencia", facilitando así la selección de las variables dominantes para el proceso de calibración posterior.

5.1.2. **Resumen de resultados**

En la Figura 5.1 se muestra cómo los parámetros estudiados influyen en las simulaciones de las variables objetivo: humedad relativa (HR, representada con triángulos rojos) y temperatura de bulbo seco (T°, con cuadrados azules), dentro de la zona térmica principal (HAB_MODELO).

El grado de influencia (eje horizontal) se mide mediante el error absoluto medio normalizado (NMAE): cuanto mayor es este valor, mayor es el impacto del parámetro sobre la variable objetivo. Por el contrario, valores cercanos a cero

indican que el parámetro tiene una baja influencia por sí solo dentro de los rangos evaluados.

Además, el indicador $\Delta S_{\%}$ refleja el nivel de no linealidad del efecto total de cada parámetro. Debido a la gran dispersión y magnitud de algunos datos, y a la presencia de efectos casi nulos, el eje $\Delta S_{\%}$ se representa en escala pseudo-logarítmica (*symlog*). Esta escala combina una relación lineal para valores cercanos a cero (0% a 1%) con una escala logarítmica para valores superiores al 1%, lo que permite visualizar simultáneamente tanto los parámetros de bajo impacto como los valores extremos.

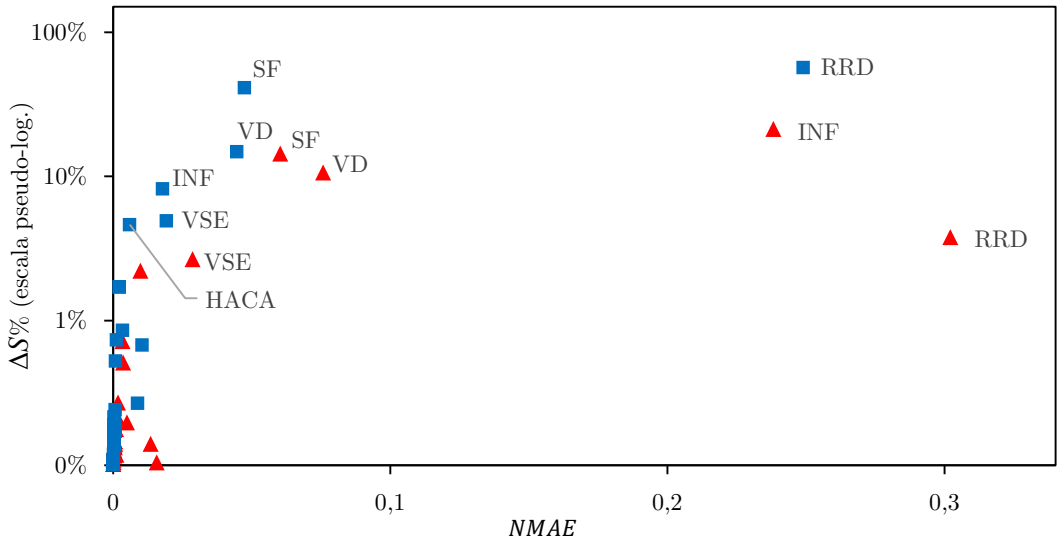


Figura 5.1 Resultados del SA sobre HR (triángulos rojos) y T° (cuadrados azules) en 'HAB_MODELO'

Este mismo gráfico se elaboró para las demás cuatro zonas térmicas (ver Anexo E). Se realiza una ponderación e integración de los resultados de las cinco zonas térmicas para obtener un gráfico aproximado de la sensibilidad de ambas variables objetivo en la totalidad del modelo del edificio (Figura 5.2).

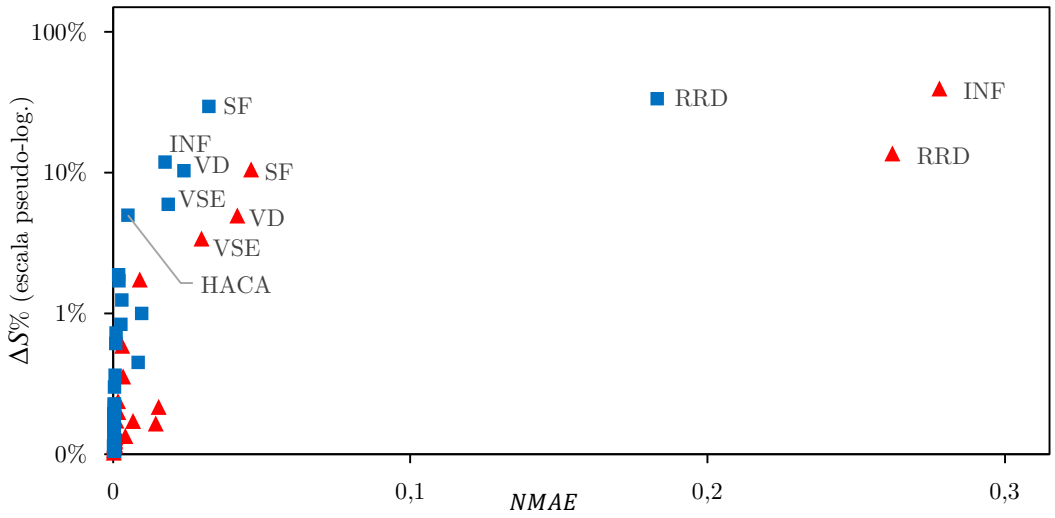


Figura 5.2 Resultados del SA sobre HR (triángulos rojos) y T° (cuadrados azules) en 5 zonas térmicas

Las Figuras 5.1 y 5.2 muestran que los cuatro parámetros más influyentes sobre el modelo, según el método de análisis utilizado, son: RRD (reflexión del suelo para radiación difusa), presente como uno de los factores de mayor influencia en el gráfico de ambas variables objetivo; INF (factor de infiltraciones), parámetro de mayor influencia sobre la HR y tercero/cuarto más relevante respecto de la T°; SF (fracción solar al aire), segundo de mayor relevancia en la T° y tercero más importante sobre la HR y; VD (ventana de doble panel), cuarto en el ranking de ambas variables objetivo. Otros parámetros con presencia, aunque con menor importancia relativa, son: VSE (ventana simple exterior) y HACA (capacitancia térmica del hormigón armado).

Por lo tanto, en base al análisis de estos resultados se concluye que, a partir del conjunto inicial de 35 parámetros de entrada del modelo, 6 de ellos por sí solos tienen un impacto significativo en los resultados modelados. Como consecuencia, sólo estas variables del modelo se tendrían en cuenta en el procedimiento de calibración posterior. Sin embargo, para reducir el tiempo y

los recursos computacionales requeridos, sólo se utilizarán los 3 más importantes y con posibilidad de diferenciación por zona para el procedimiento de calibración, es decir: SF, INF y VD.

5.2. Metodología de calibración y validación

Se aplicó una metodología de calibración manual: se varía un número acotado de parámetros —determinados por el análisis de sensibilidad— en valores discretos, buscando minimizar un conjunto de métricas de error objetivo. Una vez fijados los parámetros del modelo calibrado, se evalúa el desempeño de este sobre una ventana de datos independiente (validación).

5.2.1. Métricas de error

Para el proceso de calibración y caracterización del ajuste alcanzado se utilizan las siguientes métricas de error —con sus abreviaturas en inglés—: el error medio (MBE), el error de sesgo medio normalizado (NMBE), el error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de variación del error cuadrático medio (CV(RMSE)), definidas originalmente por ASHRAE Guideline 14 [27] para la calibración de modelos en función de variables de consumo energético. Se obtienen a partir de:

$$\mathrm{MBE} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(X_{\mathrm{i,sim}} - X_{\mathrm{i,med}})}{n-1} \tag{1.25}$$

$$\mathrm{NMBE} = \frac{\mathrm{MBE}}{\bar{X}_{\mathrm{med}}} \tag{1.26}$$

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_{\mathrm{i,sim}} - X_{\mathrm{i,med}})^2}{n-1}} \tag{1.27}$$

$$\mathrm{CV(RMSE)} = \frac{\mathrm{RMSE}}{\bar{X}_{\mathrm{med}}} \tag{1.28}$$

Donde:

- n es el número de datos en el período.
- $X_{\mathrm{i,med}}$ y $X_{\mathrm{i,sim}}$ corresponden a los datos medidos y simulados, respectivamente.
- $\bar{X}_{\mathrm{med}}$ corresponde al promedio de los datos medidos.

Adicionalmente, se incorpora el coeficiente de determinación (R^2), calculado como el cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson entre las series medida y simulada:

$$\mathrm{R^2} = \left[\frac{\sum(X_{\mathrm{i,med}} - \bar{X}_{\mathrm{med}})(X_{\mathrm{i,sim}} - \bar{X}_{\mathrm{sim}})}{\sqrt{\sum(X_{\mathrm{i,med}} - \bar{X}_{\mathrm{med}})^2 \cdot \sum\left(X_{\mathrm{i,sim}} - \bar{X}_{\mathrm{sim}}\right)^2}}\right]^2 \tag{5.3}$$

Donde:

- $\bar{X}_{\mathrm{sim}}$ corresponde al promedio de los datos simulados.

R^2 cuantifica qué fracción de la variabilidad de una serie queda explicada linealmente por la otra, es decir, cuán bien el modelo reproduce la forma y la fase de las oscilaciones. Es adimensional, varía entre 0 (sin correlación lineal) y 1 (correlación lineal perfecta) y, por construcción, no detecta sesgos sistemáticos: un desfase constante o un error de escala entre ambas series no

lo modifica [35]. Por ello se reporta junto con el RMSE, sensible a la magnitud de las diferencias, mientras que NMBE y CV(RMSE) continúan como las funciones objetivo minimizadas durante el ajuste paramétrico.

La ASHRAE Guideline 14 [27] establece que un modelo puede considerarse calibrado si NMBE $\leq 5\%$ y CV(RMSE) $\leq 15\%$ para datos mensuales, o NMBE $\leq 10\%$ y CV(RMSE) $\leq 30\%$ para datos horarios; no obstante, como se discutió en el Estado del Arte, estos criterios fueron concebidos para variables de consumo energético, sin que exista aún un estándar equivalente y ampliamente adoptado para variables de estado como la temperatura interior [31]. Pese a ello, NMBE y CV(RMSE) se adoptan aquí como funciones objetivo prácticas del ajuste manual, dada su amplia utilización en la literatura de calibración de modelos térmicos, sin que ello implique adoptar su criterio de aceptación para reportar el resultado logrado.

En ausencia de dicho estándar, el ajuste se reporta mediante RMSE y R^2, contrastados contra dos referencias: la incertidumbre instrumental de los dataloggers utilizados ($\pm 0{,}2$ °C para temperatura [49]; ± 3 %HR para humedad relativa [50]): un RMSE del orden de esa magnitud representa, en la práctica, el límite de precisión alcanzable; y los resultados de un estudio comparable de validación térmica por temperatura interior en vivienda unifamiliar (Sarna et al., 2022 [28]), que considera la correlación fuerte cuando el coeficiente de Pearson supera 0,7, alcanzando en sus propios resultados valores entre 0,79 y 0,94 según la habitación y el período analizado.

5.2.2. Ventanas de evaluación

La calibración del modelo se realizó sobre la ventana de datos comprendida entre las 10:00 del 27 de enero y las 21:00 del 2 de febrero (155 horas). La validación, por su parte, se llevó a cabo sobre la ventana independiente comprendida entre las 00:00 del 3 de febrero y las 19:00 del 8 de febrero (139 horas). Ambas series temporales forman parte del período de datos registrados de oscilación libre del edificio.

Cabe precisar que tanto la ventana de calibración como la de validación se circunscriben a la temporada estival (Capítulo 3). Esta condición acota el alcance de la validación empírica: los datos cubren principalmente escenarios de alta carga solar, marcada oscilación térmica diaria, baja nubosidad y baja humedad relativa. En consecuencia, la capacidad predictiva del modelo en condiciones de invierno o en estaciones intermedias queda sin verificar contra mediciones.

5.2.3. Procedimiento de calibración

Las variables utilizadas durante el proceso de calibración fueron: la fracción solar al aire (SF) por zona, tasa de infiltraciones (INF) por zona, y tipo de acristalado doble (VD), presente en gran parte de la fachada del edificio y, por ende, con influencia en varias habitaciones de este. Partiendo de una configuración base general (SF = 0,1; INF = 0,1 [ren/h]; VD = 14002).

Selección de acristalado

Se evaluaron tres códigos (tipos) de VD mediante la comparación de los promedios zonales de NMBE y CV(RMSE) para la temperatura (T°).

Orden de calibración

Para la calibración de SF e INF en cada zona, se definió un orden de barrido según la supuesta influencia en el comportamiento térmico de cada zona con respecto a otra, y la habitación u oficina principal. Por este motivo, el orden fue el siguiente: Entrepiso → Lab-Mec → Pasillo → Oficina lateral → Oficina Principal.

Optimización de SF

Una vez seleccionado el código de acristalado doble, SF se evaluó en los valores {0,0; 0,2}, zona por zona, determinando en cada una el valor que minimizara las métricas de error sobre la T° (si el valor óptimo correspondía al límite superior del rango evaluado, se evaluaba un nivel más arriba, es decir, SF = 0,3 , y sucesivamente).

Optimización de INF

Finalmente, una vez definido el SF por cada zona, se repite el procedimiento, ahora variando la tasa de infiltraciones (INF) por cada zona, y escogiendo el valor que minimizara las métricas de error de la humedad relativa (HR).

5.3. Resultados del ajuste

Tras la aplicación del procedimiento de calibración manual descrito y posterior criterio de validación, se han obtenido los siguientes resultados.

5.3.1. Calibración del modelo de edificio

Elección del acristalado óptimo

La Tabla 5.4 resume el impacto de tres configuraciones de ventanas de doble panel en las métricas de error ponderadas de todas las zonas térmicas respecto de la temperatura ambiente. La configuración de código **14002** mostró el mejor desempeño, con un NMBE de 0,2% y un CV(RMSE) de 1,4%, por lo que fue la configuración seleccionada para las etapas siguientes del proceso de calibración.

Tabla 5.4 Influencia del tipo de acristalado doble sobre las métricas de error

	Cód. Ref.	**NMBE[T°]**	**CV(RMSE)[T°]**
Ventanas de doble panel (promedio de todas las zonas térmicas)	15008	-1,5%	2,5%
	14002	0,2%	1,4%
	3102	-1,1%	2,2%

Calibración por zonas térmicas

La Tabla 5.5 resume la calibración del modelo en cinco zonas clave, mediante el ajuste de la tasa de infiltración (INF) y el factor solar (SF). Los errores en temperatura se redujeron significativamente, como en la oficina principal, donde el NMBE alcanzó 0,14% y el CV(RMSE) 0,88%. Sin embargo, la humedad relativa presenta mayores discrepancias, especialmente en "Pasillo" (CV(RMSE) de 8,08%), lo que refleja las limitaciones del modelo para capturar fenómenos complejos de transferencia de masa.

Tabla 5.5 Resultado de calibración por zonas térmicas

Zona	**INF**	**SF**	**NMBE[T°]**	**CV[T°]**	**NMBE[HR]**	**CV[HR]**
Oficina Principal	Medio (0,1)	0,2	-0,14%	0,88%	-2,91%	7,50%
Oficina Lateral	M. Bajo (0,05)	0,1	0,15%	1,64%	-1,85%	6,74%
Pasillo	M. Bajo (0,05)	0,0	0,21%	2,26%	1,32%	8,08%
Laboratorio Tec. Mec.	MÍN (0,004)	0,1	0,69%	1,17%	-4,34%	4,74%
Entrepiso	M. Bajo (0,05)	0,0	-0,15%	1,72%	-1,57%	6,88%

El Laboratorio de Tecnología Mecánica convergió al límite inferior del rango evaluado (0,004 ren/h), consistente con tratarse de un recinto hermético subterráneo, sin ocupación por época de verano.

Ajuste de la Oficina Principal

Para profundizar en el ajuste alcanzado en la Oficina Principal, se complementan los resultados de la Tabla 5.5 con el cálculo del error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de determinación (R^2) sobre las series horarias calibradas de temperatura y humedad relativa.

Tabla 5.6 Ajuste (RMSE, R^2) en la ventana de calibración – Oficina Principal

Variable	**RMSE**	**R^2**
Temperatura (T°)	0,254 °C	0,984
Humedad Relativa (HR)	2,93 %HR	0,774

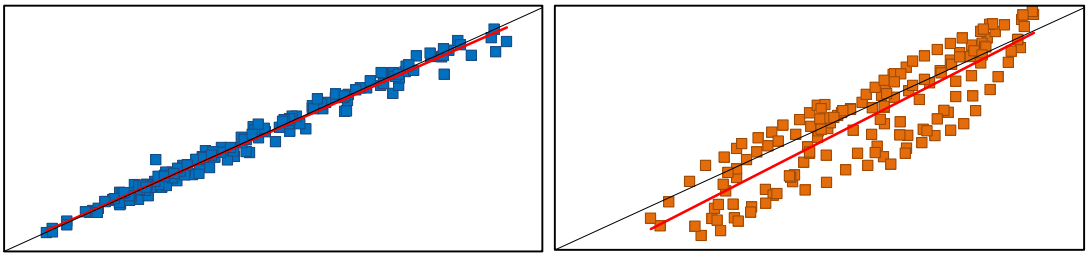


Figura 5.3 Diagramas de dispersión Medido (eje x) vs. Simulado (eje y) con la recta de identidad 1:1. T° a la izquierda y HR a la derecha

La temperatura del aire presenta un ajuste sobresaliente (RMSE = 0,254 °C; R^2 = 0,984): su recta de tendencia prácticamente coincide con la de identidad en todo el rango medido, evidenciando que el modelo no solo sigue la dinámica de la oscilación horaria, sino que reproduce su magnitud absoluta sin sesgos apreciables. La humedad relativa, en cambio, muestra un ajuste más moderado (RMSE = 2,93 %HR; R^2 = 0,774): si bien la correlación entre ambas series es alta, la tendencia simulada se ubica consistentemente por debajo de la recta de identidad, indicando que el modelo subestima la humedad relativa medida de forma sistemática a lo largo de todo el rango.

5.3.2. Validación de la Oficina Principal

Aplicando el modelo calibrado (ver Tablas 5.4 y 5.5 con valores finales de VD, SF y INF) sobre la ventana independiente de validación (3 de febrero 00:00 – 8 de febrero 19:00), se obtuvieron los siguientes resultados en la Of. Principal:

Tabla 5.7 Ajuste (RMSE, R^2) en la ventana de validación – Oficina Principal

Variable	**RMSE**	**R^2**
Temperatura (T°)	0,492 °C	0,965
Humedad Relativa (HR)	4,66 %HR	0,630

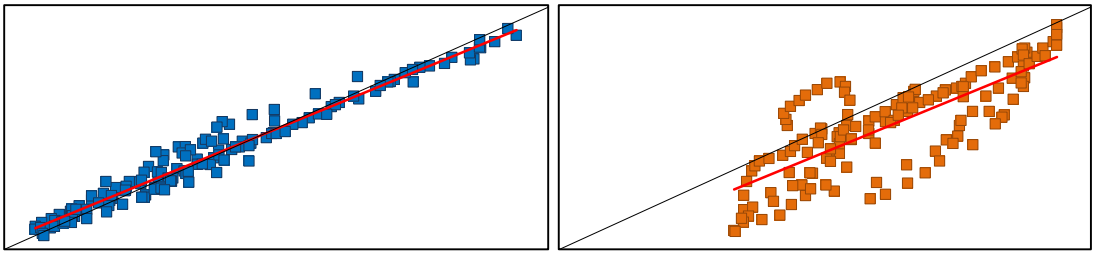


Figura 5.4 Diagramas de dispersión Medido (eje x) vs. Simulado (eje y), ventana de validación. T° a la izquierda y HR a la derecha

Comparando ambas ventanas, el ajuste de la temperatura se mantiene prácticamente estable: el RMSE aumenta de 0,254 °C a 0,492 °C, y el coeficiente de determinación, si bien disminuye ($R^2 = 0{,}984 \rightarrow 0{,}965$), se mantiene alto. Esto indica que el modelo conserva su capacidad de seguir la dinámica térmica real sobre datos no vistos. En ambas ventanas la recta de correlación presenta una pendiente levemente menor a la identidad, subestimando ligeramente las temperaturas más altas y sobrestimando las más bajas — un efecto menor dado el alto nivel de correlación alcanzado en ambos casos.

La humedad relativa, en cambio, muestra una degradación más marcada: el RMSE aumenta de 2,93 %HR a 4,66 %HR y el R^2 cae de 0,774 a 0,630, indicando

que, a diferencia de la temperatura, su ajuste generaliza de forma más limitada fuera de la ventana de calibración —consistente con las limitaciones del modelo de humedad discutidas en el análisis de incertidumbre más adelante (ver sección 7.2.1). El sesgo de subestimación ya observado en calibración se acentúa en la ventana de validación, aunque con menor pendiente de la recta de correlación; a diferencia de la calibración —donde las mayores discrepancias se concentraban en valores bajos de HR—, en la ventana de validación estas se desplazan hacia valores altos, lo que podría asociarse a cambios en las condiciones de contorno entre ambos períodos.

En conjunto, ambos resultados se sitúan dentro de un orden de magnitud razonable respecto de las referencias de contraste definidas en Métricas de error: el RMSE de temperatura en validación (0,492 °C) es un poco mayor al doble de la incertidumbre instrumental del sensor (±0,2 °C), evidenciando un alto nivel de ajuste alcanzado. Por su parte, el RMSE en validación de la humedad relativa (4,66 %HR) muestra un comportamiento similar, superando solo en torno a un 50% la magnitud de la incertidumbre instrumental (±3 %HR). Los valores de R^2 obtenidos (T°: 0,965; HR: 0,630) son, en ambos casos, comparables a los resultados reportados por Sarna et al. [28] para una validación térmica similar, confirmando que el modelo calibrado conserva una capacidad predictiva adecuada sobre datos no vistos, con mejor desempeño en temperatura que en humedad relativa.

CAPÍTULO 6

CASO DE APLICACIÓN: OFICINA CON SISTEMA HVAC + TES

En el presente capítulo se utiliza el modelo térmico calibrado de la oficina principal para el diseño y aplicación de un sistema de 'Almacenamiento Total' (*Full Storage*) para su climatización, buscando desacoplar la generación de frío del consumo o demanda [12].

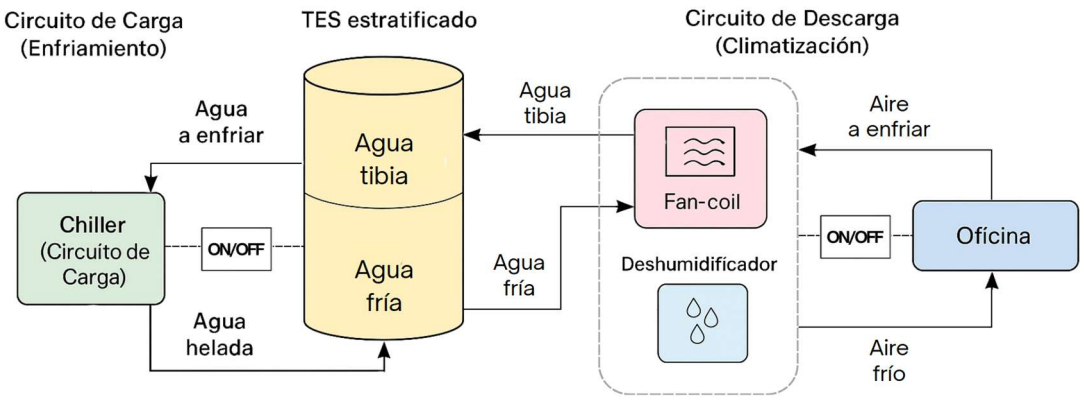


Figura 6.1 Esquema conceptual del sistema de almacenamiento y distribución de energía térmica. Fuente: Elaboración propia.

El sistema propuesto, cuyo esquema conceptual se ilustra en la Figura 6.1, se compone de tres circuitos interconectados:

1. **Circuito de Carga (Enfriamiento)**: Compuesto por una bomba de calor en modo frío (o *chiller*) que se encarga de enfriar el agua contenida en un tanque de almacenamiento durante el horario valle.
2. **Tanque de Almacenamiento Térmico (TES)**: Un tanque de agua estratificado que actúa como un acumulador de energía, guardando el agua fría hasta que sea requerida [12].
3. **Circuito de Descarga (Climatización)**: Conformado por una unidad terminal *Fan-Coil*, que es un intercambiador de calor aire-agua, y un deshumidificador. Durante el horario laboral, se hace circular el agua fría del tanque por el *Fan-Coil* para extraer calor del aire de la oficina y mantener la temperatura dentro del rango de confort.

Un sistema de bombeo se encargará de la circulación del fluido (agua) en los distintos circuitos, mientras que un sistema de controladores gestiona la operación de los equipos según la hora del día y, la temperatura y humedad de la oficina. Más adelante se detallará el dimensionamiento de estos componentes, su implementación en TRNSYS y la estrategia de control que gobierna su funcionamiento.

6.1. Metodología de dimensionamiento del sistema

A continuación, se calculan los requerimientos energéticos necesarios para mantener las condiciones de confort en la oficina utilizando el modelo calibrado, y se dimensionan los componentes principales del Sistema de Climatización y Almacenamiento de Energía Térmica (HVAC + TES).

6.1.1. Criterios de diseño y demanda máxima

El sistema de climatización se configura para garantizar el confort térmico según la norma ANSI/ASHRAE Standard 55 [5]. Esta norma especifica las combinaciones de factores ambientales —temperatura, radiación térmica, humedad relativa y velocidad del aire— y personales —actividad y vestimenta— que producen condiciones térmicas aceptables para la mayoría de los ocupantes (confort térmico).

Se define un escenario de ocupación realista: dos personas en horario de oficina (9:00–18:00 horas, de lunes a viernes), con una carga interna total de 113 [W] proveniente de equipos electrónicos e iluminación. Para un perfil de actividad sedentaria (1,2 [met]) y vestimenta de verano ligera (0,75 [clo]), se establecen los siguientes setpoints durante el horario ocupado:

- **Temperatura del aire interior** (T_{int}): Valor objetivo de 23,5 °C, con una banda muerta de control de ±1,5 °C. Este valor se sitúa dentro del rango de confort operativo estival recomendado [10], optimizando el balance entre satisfacción térmica y consumo energético.
- **Humedad Relativa** (HR): Límite objetivo del 55%. Mantener la humedad controlada es crucial, no tan solo por la sensación térmica (evaporación de la piel), sino también para la calidad del aire interior y la prevención de riesgos microbiológicos [5].

Para determinar la potencia de extracción de calor requerida para la climatización de la oficina principal, se realiza una simulación de ésta con un paso de tiempo de 4 [min], abarcando los 12 primeros días del mes de enero, utilizando año meteorológico típico de la biblioteca de TRNSYS. Se emplea un

equipo ideal de acondicionamiento y deshumidificación, con una potencia de extracción ilimitada, de respuesta instantánea y operación variable, configurado para mantener la temperatura del aire interior constante en 23,5 °C y una humedad relativa del 55%. Como resultado, se obtiene la curva de potencia de extracción de calor sensible y calor latente por deshumidificación del equipo ideal para **el día de mayor demanda** térmica (Figura 6.2).

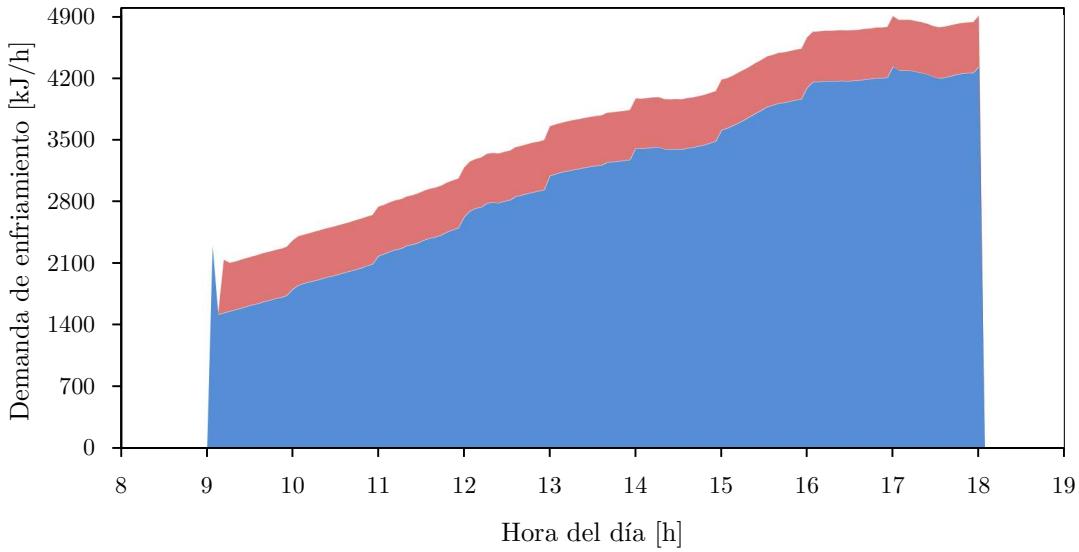


Figura 6.2 Demanda por climatización (equipo ideal) durante jornada de mayor consumo. [Demanda de calor sensible (azul) – Demanda de calor latente (rojo)]

La suma total de las áreas cuantifica la demanda máxima diaria de extracción de calor necesaria para confort térmico (~32.900 [kJ]).

6.1.2. **Dimensionamiento del HVAC + TES**

El sistema propuesto opera bajo una estrategia de Almacenamiento Total (*Full Storage*). Esto significa que el circuito de carga operará exclusivamente en el

horario valle (nocturno), acumulando la totalidad de la demanda diaria en el tanque TES para ser utilizada durante el día. Mientras que el sistema de descarga funcionará en horario hábil para mantener condiciones de confort higrotérmico.

Volumen del Almacenamiento Térmico (TES)

Para almacenar la cantidad de energía necesaria para la satisfacción de la demanda térmica ($Q_{\text{día}}$), con un máximo delta de temperatura (ΔT) en el estanque fijado en 5,5 °C (de inicio a fin de ciclo), considerando un factor de sobredimensionamiento por pérdidas por almacenamiento del 5%, y estimando la capacidad calorífica y densidad del agua en torno a 7 °C, se necesita el siguiente volumen de almacenamiento.

$$V_{\text{strg}} = \frac{Q_{\text{día}}}{c_{\text{p}} \cdot \Delta T \cdot \rho} \cdot 1{,}05$$

$$= \frac{32.900[\text{kJ}] \cdot 1{,}05}{4{,}18\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot °\text{C}}\right] \cdot 5{,}5[°\text{C}] \cdot 1\left[\frac{\text{kg}}{\text{lt}}\right]}$$

$$\approx 1500 \ [\text{lt}] \qquad (6.1)$$

Sistema Auxiliar de Enfriamiento

La capacidad de enfriamiento del sistema de carga debe ser suficiente para acumular los 32.900 [kJ] de "frío" en el volumen de 1.500 [lt] (ecuación 6.1) durante el tiempo disponible para ello. El agua almacenada será enfriada en horario valle (de bajo consumo), concretamente, entre las 01:00 y las 06:00 horas ($t_{\text{valle}} = 5[\text{h}]$). La potencia de enfriamiento de la Bomba de Calor ($\dot{Q}_{\text{BC,req}}$) necesaria, por tanto, se calcula como:

$$\dot{Q}_{\text{BC,req}} = \frac{Q_{\text{día}}}{t_{\text{valle}}}$$

$$= \frac{32.900\ \text{[kJ]}}{5\ \text{[h]}}$$

$$= 6.580\ \left[\frac{\text{kJ}}{\text{h}}\right]$$

$$\cong 1.830\ \ \text{[W]} \qquad (6.2)$$

Luego, dado que el equipo debe ser dimensionado con un margen debido a las eficiencias propias del proceso, se modelará un equipo basado en una Bomba de Calor comercial con una capacidad nominal de refrigeración de 2.500 [W] para garantizar una carga rápida del tanque, operando de manera eficiente.

$$\dot{Q}_{\text{BC,nom}} = 2.500\ [W] \qquad (6.3)$$

Para el circuito de descarga, la selección de las características para la modelación de la Unidad Terminal (*Fan-Coil*) se rige por la demanda máxima instantánea de la oficina.

Unidad Terminal (Fan-Coil)

La unidad terminal debe tener la capacidad suficiente para abatir la carga térmica sensible y latente en el momento más exigido del día. Observando el comportamiento de la demanda en el gráfico de la Figura 6.2, se identifica un *peak* de demanda de extracción de calor cercano a 4.900 [kJ/h] (aprox. 1.360 [W]) hacia el final del horario hábil.

Por consiguiente, la capacidad total mínima requerida es la suma de ambas cargas en el punto de diseño:

$$\dot{Q}_{FC,req} = \dot{Q}_{sensible,máx} + \dot{Q}_{latente}$$
$$\cong 1.360 \quad [\text{W}] \tag{6.4}$$

Para asegurar las condiciones de confort y permitir una respuesta rápida ante ganancias térmicas imprevistas (como infiltraciones o mayor ocupación), se aplica un factor de seguridad estándar. Por consiguiente, el sistema a modelar se configurará en base a una unidad *Fan-Coil* comercial de 1.500 [W] de capacidad total nominal (o superior), dimensionada para operar con un régimen de agua helada de 5 a 10 °C. Esta unidad será la encargada de transferir el frío almacenado en el tanque hacia el aire de la oficina, regulando tanto la temperatura (calor sensible) como la humedad (deshumidificación).

$$\dot{Q}_{FC,\text{nom}} = 1.500 \quad [\text{W}] \tag{6.5}$$

Bombas de Circulación Hidráulica

El movimiento del fluido caloportador (agua) se realiza mediante dos bombas centrífugas independientes, dimensionadas en función del caudal requerido para transportar la potencia térmica de diseño con un salto térmico (ΔT) controlado de 5 °C en el *Fan-Coil*.

- **Bomba del Circuito de Carga (B_1)**: Debe garantizar la potencia de enfriamiento nominal de operación de la Bomba de Calor ($\dot{Q}_{\text{BC,nom}} = 2.500\ [\text{W}]$) para asegurar un intercambio eficiente en el

evaporador y evitar el congelamiento. El caudal másico de diseño ($\dot{m}_{carga}$) se calcula como:

$$\dot{m}_{\text{carga}} = \frac{\dot{Q}_{\text{BC,nom}}}{c_p \cdot \Delta T} = \frac{2{,}5\ [\text{kW}] \cdot 3.600[\text{seg/h}]}{4{,}18\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot °\text{C}}\right] \cdot 5\ [°\text{C}]} \approx 430\ \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}}\right] \qquad (6.6)$$

Esto equivale a un caudal volumétrico aproximado de 430 [L/h].

- **Bomba del Circuito de Descarga ($\boldsymbol{B_2}$)**: Dimensionada para suministrar el caudal necesario al *Fan-Coil* para abatir la carga máxima ($\dot{Q}_{FC,\text{nom}} = 1.500\ [\text{W}]$):

$$\dot{m}_{\text{descarga}} = \frac{\dot{Q}_{FC,\text{nom}}}{c_p \cdot \Delta T} = \frac{1{,}5\ [\text{kW}] \cdot 3.600[\text{seg/h}]}{4{,}18\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot °\text{C}}\right] \cdot 5\ [°\text{C}]} \approx 260\ \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}}\right] \qquad (6.7)$$

Esto equivale a un caudal volumétrico aproximado de 260 [L/h].

6.2. Implementación del sistema en TRNSYS

Para evaluar el desempeño dinámico del sistema diseñado, se trasladó el esquema conceptual a la plataforma de simulación TRNSYS 17. La Figura 6.3 ilustra la topología del sistema implementado en el Simulation Studio, donde se integran el modelo del edificio (Type 56), los datos meteorológicos y los circuitos hidráulicos de climatización.

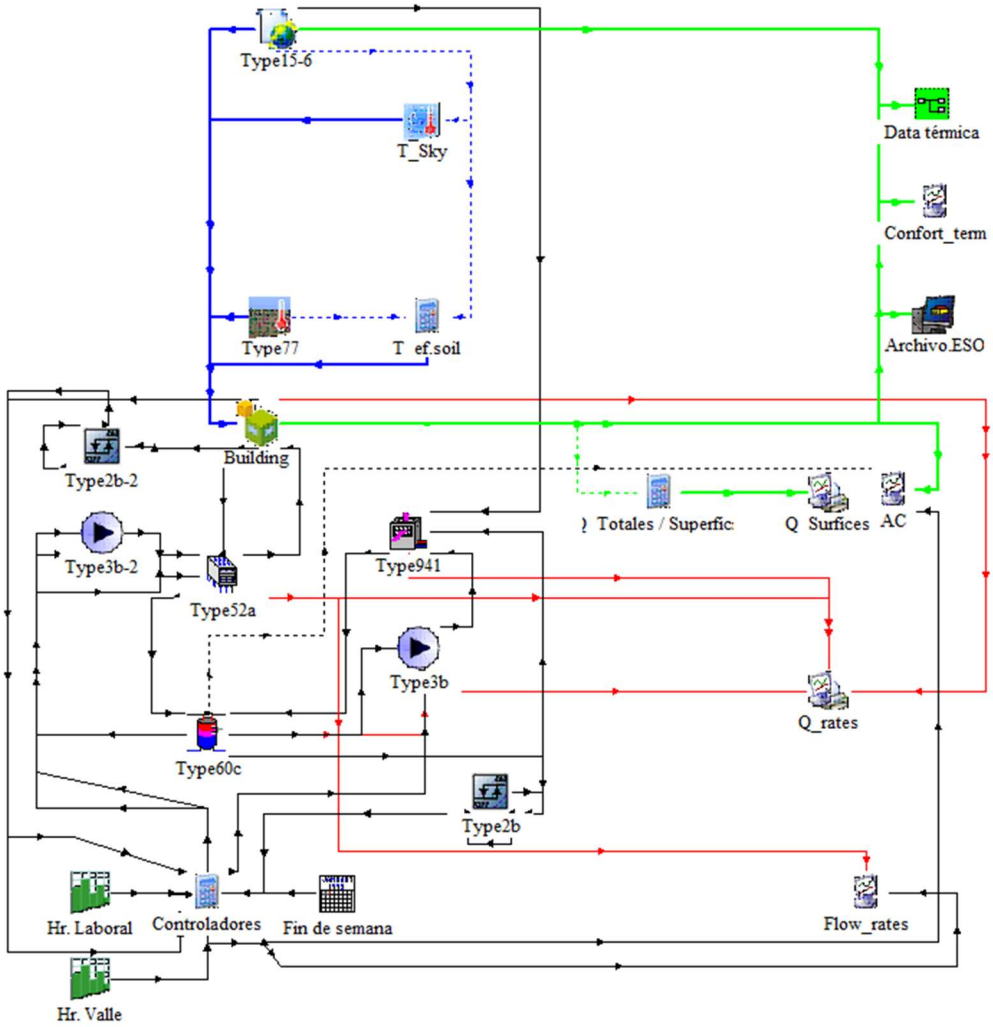


Figura 6.3 Modelamiento Energético en TRNSYS de la Oficina Principal, integrando Sistema de Climatización y TES – Simulation Studio

6.2.1. **Descripción de componentes y circuito**

La configuración hidráulica se divide en dos lazos independientes acoplados térmicamente por el volumen de acumulación. Los componentes principales seleccionados de la biblioteca estándar y TESS de TRNSYS son:

- **Tanque de Almacenamiento** (TES): Se utilizó el Type 60c, que modela un tanque estratificado verticalmente. Este componente es el núcleo del sistema, recibiendo agua enfriada desde la bomba de calor en los nodos inferiores y retornando agua tibia desde el edificio a los nodos superiores, preservando la estratificación térmica esencial para la eficiencia del sistema.
- **Generación de Frío** (Bomba de Calor): Se empleó el Type 941, que simula una bomba de calor aire-agua. Este equipo opera en el circuito de carga, extrayendo calor del agua y liberándolo al exterior.
- **Unidad Terminal** (Fan-Coil): La transferencia de calor sensible con la zona térmica se modeló mediante el Type 52a (Serpentín de enfriamiento). Este componente interactúa directamente con el nodo de aire del Type 56 (modelo del edificio), calculando el intercambio de calor sensible y latente (deshumidificación) basado en el caudal de agua fría suministrado y las condiciones psicrométricas de la oficina.
- **Deshumidificador ideal** (Cooling Manager de TRNBuild): Además del serpentín del *Fan-Coil*, la humedad relativa se gestionó a través del setpoint en el Cooling Manager de TRNBuild. En cada paso de tiempo el Type 56 calcula cuánta masa de vapor de agua debe extraerse para forzar la convergencia de ω al valor correspondiente al %HR dado a la temperatura de zona vigente.
- **Circulación**: El movimiento de fluidos se gestionó mediante bombas de velocidad simple (Type 3b), una dedicada al circuito de carga (Bomba de Calor ↔ Tanque) y otra al circuito de descarga (Tanque ↔ *Fan-Coil*).

Es importante señalar que la parametrización de los equipos modelados (curvas de rendimiento de la Bomba de Calor, eficiencias de bombeo y transmitancia térmica del tanque) se hizo considerando estándares técnicos de equipos comerciales del mercado local. Por consiguiente, los resultados energéticos presentados en los

capítulos posteriores deben interpretarse bajo el supuesto de un equipamiento de gama media en mantenimiento adecuado. El modelo asume que no existe degradación de los materiales aislantes ni incrustaciones en los intercambiadores de calor que penalicen la transferencia térmica a lo largo del tiempo.

6.2.2. **Estrategia de control**

La gestión energética se implementó mediante controladores diferenciales (Type 2b) y funciones de forzado temporal, definiendo dos lógicas de operación excluyentes para maximizar el desplazamiento de carga:

Lógica de carga nocturna (Horario Valle)

El funcionamiento de la bomba de calor y la bomba del circuito de carga está habilitado exclusivamente durante la ventana de tiempo definida como "Hr. Valle" (01:00 a 06:00 hrs). Dentro de este horario, el Type 2b activa el enfriamiento solo si la temperatura promedio del tanque supera el setpoint de almacenamiento (7 °C), deteniéndose cuando la temperatura media del tanque alcanza los 5 °C.

Lógica de descarga diurna (Climatización)

El circuito de descarga opera durante el "Hr. Laboral" (09:00 a 18:00 hrs). La activación de la bomba del *Fan-Coil* está supeditada a la temperatura interior de la oficina: el sistema arranca cuando la temperatura de zona supera los 23,5 °C (más una banda muerta de 1,5 °C) y se detiene al alcanzar el piso del rango de confort, extrayendo agua fría del fondo del tanque sin encender el equipo generador de frío.

6.2.3. **Supuestos de simulación y cálculo comparativo**

La Tabla 6.1, a continuación, resume la totalidad de los supuestos de cálculo considerados para la simulación y comparación del sistema HVAC+TES vs. sistema convencional equivalente.

Tabla 6.1 Supuestos de simulación aplicados.

Aspecto	**Supuesto adoptado**
Clima y periodo	Año típico de Santiago (TMY2, Type 15-6); 300 hrs. desde el 1 de enero; paso de 2 min.
Ocupación y ganancias	2 personas (150 [W] c/u: 75 [W] sensibles + 75 [W] latentes), 2 computadores de 50 [W] e iluminación de 13 [W]; L–V, 09:00–18:00.
Ventilación	Sin aire exterior: el fan-coil recircula el 100%; renovación solo por infiltración calibrada (0,1 ren/h).
Fan-coil (Type 52a)	Enciende sobre 25 °C y apaga bajo 22 °C, de 09:00 a 18:00 en días hábiles; aire hasta 680 [kg/h] y agua hasta 300 [kg/h], modulados por la temperatura de la oficina.
Control de humedad	Deshumidificador ideal (Cooling Manager): HR $\leq$ 55% en horario laboral. Consumo: ~180 [W] eléctricos mientras opera (factor de energía ≈1,15 L/kWh).
Estanque (Type 60c)	1,5 [m^3], H = 1,5 [m], U = 0,30 [W/m^2K], ambiente constante a 21 °C, sin calefactores.
Carga	Bomba de calor habilitada de 01:00 a 06:00 en días hábiles; enciende con $T°_{media} > 7$ °C y apaga bajo 5 °C.
Consumo de la bomba de calor	Calculado como el calor extraído dividido por un COP_R constante de 3,0.
Bombas y ventilador	Potencias de la planilla de post-proceso: B1 ≈ 31 [W], B2 = 25 [W], ventilador de 7 a 70 [W].
Sistema de referencia	Equipo convencional que atiende en tiempo real la misma carga del fan-coil con COP_R constante de 2,5, más el mismo consumo de deshumidificación.

CAPÍTULO 7

RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos a partir del modelo calibrado, abordando la validación higrotérmica, la caracterización del comportamiento pasivo del edificio, el desempeño del sistema HVAC+TES y los indicadores de eficiencia energética global.

7.1. Validación del modelo térmico

La validación de la "línea base" (modelo sin carga) da respaldo de que el modelo computacional reproduce con fiabilidad la respuesta dinámica del edificio ante condiciones climáticas reales y, por ende, otorga un mayor nivel de confianza en los resultados energéticos posteriores, que sustentan la evaluación térmico-energética desarrollada en el resto de este capítulo.

7.1.1. Ajuste higrotérmico del modelo calibrado – Oficina Principal

Para observar el ajuste alcanzado por la calibración manual descrita en el Capítulo 5, se contrastan las series de tiempo de las variables simuladas con los datos experimentales de la ventana de validación (del 3 al 8 de febrero 2017).

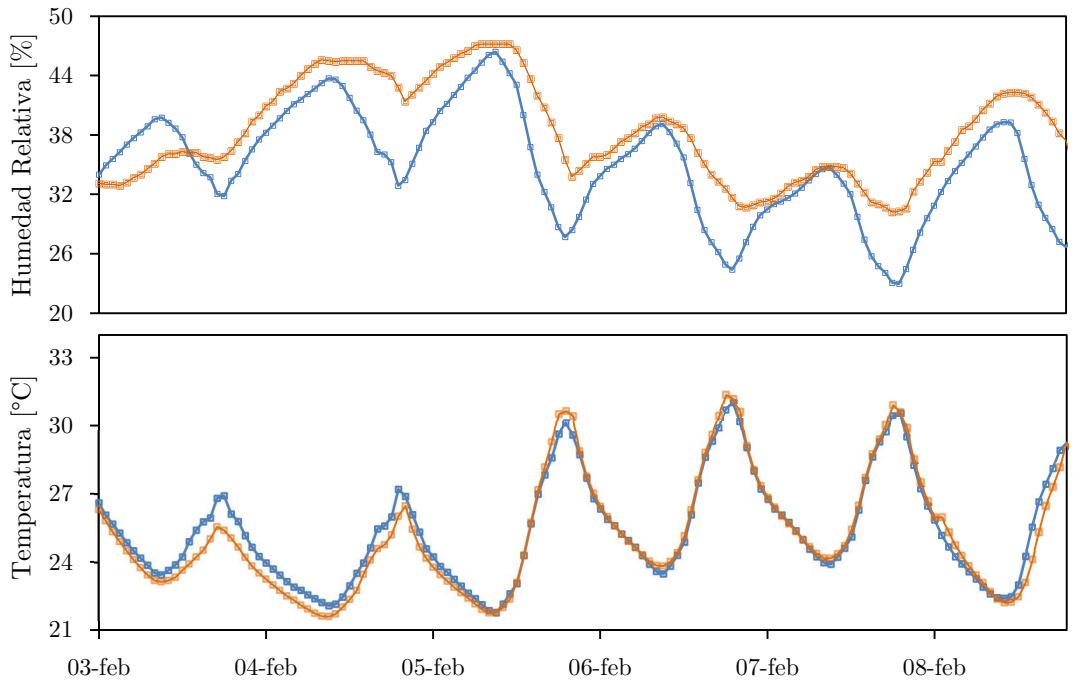


Figura 7.1 Validación del modelo higrotérmico: comparación de datos medidos (naranja) vs. simulados (azul) en la Oficina Principal

Se observa una clara correlación de la temperatura de aire simulada, la cual replica con precisión la fase y amplitud de la oscilación térmica real, capturando correctamente la inercia de la estructura. Esto se refleja cuantitativamente en un error cuadrático medio (RMSE) de 0,492 °C y un coeficiente de determinación (R^2) de 0,965 (comparable a estudios de validación similares —Sarna et al. [28]).

Respecto de la humedad relativa (gráfico superior), la simulación, aunque sigue la tendencia general y oscilación de las mediciones, tiende a subestimar sistemáticamente los datos. Esto se refleja cuantitativamente en un error cuadrático medio (RMSE) de 4,66 %HR y un coeficiente de determinación (R^2) de 0,630.

7.1.2. Análisis de fuentes de incertidumbre

Si bien el modelo demuestra un desempeño estadístico adecuado en ambas variables, existen desviaciones puntuales (especialmente en los valles de humedad relativa) que responden a dos tipos de fuentes: limitaciones estructurales del modelo e incertidumbre de los datos de referencia.

a) Incertidumbre estructural del modelo:

1. Infiltraciones de aire no controladas: el modelo usa una tasa media de renovación, mientras que en la realidad las infiltraciones varían con las ráfagas de viento, alterando el balance de humedad puntual.

2. Modelo de humedad simplificado: el Type 56 emplea Capacitancia Efectiva, que simula la inercia higroscópica del aire, pero simplifica la adsorción/desorción profunda en materiales porosos —de ahí las oscilaciones simuladas más marcadas que las mediciones, amortiguadas—. A esto se suma el desajuste entre la hipótesis de mezcla perfecta del nodo y la representatividad espacial de un punto de medición único.

b) Incertidumbre de la medición y de las entradas:

3. Precisión instrumental de los sensores Tinytag, y variabilidad/precisión de los datos meteorológicos de entrada.

El RMSE de temperatura en validación (0,492 °C) es del mismo orden de magnitud que la incertidumbre instrumental (±0,2 °C), aunque algo más del doble. El RMSE agrega el error estructural del modelo, la incertidumbre de las entradas y la de la medición de referencia; la precisión del sensor explica solo una parte de la discrepancia. Aun así, el ajuste se ubica cerca del límite de resolución que permite la instrumentación disponible.

7.2. Caracterización del comportamiento energético pasivo del edificio

Se examina el comportamiento térmico del edificio sin ocupación durante uno de los días de mayor exigencia climática del período censado, y luego, simulando una ocupación estándar se analizan los flujos de calor sensible.

7.2.1. Distribución de temperaturas en condición de alto estrés térmico

Del monitoreo realizado, se destaca el 30 de enero de 2017 como el día crítico del periodo monitoreado, registrándose una temperatura máxima del aire superior a los 30 °C al interior de la Oficina Principal.

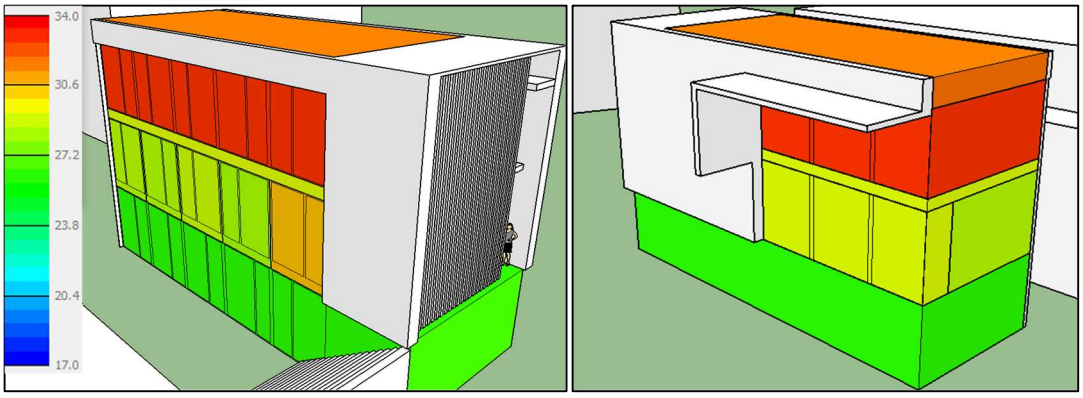


Figura 7.2 Distribución espacial de temperaturas en el modelo de edificio simulado durante horario de máxima carga – 30 de enero 2017.

La Figura 7.2 ilustra la distribución de temperaturas en el modelo del edificio durante el momento de la tarde de mayor acumulación térmica.

La visualización confirma que la Oficina Principal se encuentra sometida a condiciones más exigentes, siendo la segunda habitación con mayor temperatura del edificio. El comportamiento global del inmueble muestra un gradiente térmico claro:

- La zona oeste (más expuesta), donde se ubica la Oficina Principal, presenta las temperaturas más altas debido a la radiación vespertina. En las zonas este y sur se observa una disminución paulatina de la temperatura hacia las oficinas del fondo (este). Asimismo, el pasillo de circulación muestra condiciones más moderadas debido a su orientación sur, que limita la ganancia solar directa. La zona inferior (laboratorio subterráneo) se mantiene como el recinto más estable y fresco.

7.2.2. **Perfil térmico del modelo pasivo con ocupación**

Se analiza el perfil diario de algunos de los principales flujos de calor en la Oficina Principal bajo una configuración de "modelo pasivo con ocupación". Este análisis permite caracterizar la dinámica de la demanda energética e identificar tanto las principales cargas globales como los elementos constructivos específicos que actúan como fuentes de inercia o puentes térmicos.

La Tabla 7.1 y su gráfica (Figura 7.3) presentan la evolución horaria de los flujos de calor que fluyen desde o hacia el nodo (zona térmica), utilizando la convención de signos positiva para ganancias y negativa para pérdidas. Se observa el desglose de las contribuciones de cada componente: la radiación solar transmitida por las ventanas (norte y oeste), la transmisión de calor a través de la envolvente opaca (muros exteriores y adyacentes), carga por infiltración de aire y las ganancias internas por ocupación.

Tabla 7.1 Flujos de calor hacia la Oficina Principal durante un día de verano

[kJ/h]

Hora	G.SOL_V(W)	G.SOL_V(N)	G.SUP_EXT	G.SUP_ADJ	GxINF	G_INT
1	0,0	0,0	204,3	1227,1	-59,6	0,0
2	0,0	0,0	134,0	1187,9	-59,6	0,0
3	0,0	0,0	101,1	1233,0	-59,8	0,0
4	0,0	0,0	78,1	1274,8	-60,9	0,0
5	0,0	0,0	59,6	1316,5	-61,8	0,0
6	0,0	0,0	44,2	1355,9	-63,3	0,0
7	52,4	82,7	4,7	1209,2	-44,9	0,0
8	126,6	200,0	-46,7	886,5	-32,0	0,0
9	200,5	316,5	-80,8	597,6	-18,2	1500,0
10	251,2	396,6	-148,0	-194,8	-11,3	1500,0
11	285,6	466,3	-152,1	-551,8	2,6	1500,0
12	276,7	715,3	-150,6	-847,7	12,2	1500,0
13	287,3	1200,9	-162,1	-1152,4	18,6	1500,0
14	337,6	1423,9	-162,6	-1349,3	22,3	1500,0
15	479,4	1204,7	-144,1	-1416,2	23,4	1500,0
16	1715,2	744,4	-143,5	-1581,0	18,0	1500,0
17	2801,5	388,3	-129,0	-1674,6	11,6	1500,0
18	2807,9	250,0	-85,1	-1569,7	2,3	0,0
19	2434,3	137,6	6,1	-874,5	4,9	0,0
20	416,0	37,5	75,0	-219,9	-2,3	0,0
21	0,0	0,0	85,1	111,1	-7,4	0,0
22	0,0	0,0	71,7	242,8	-12,8	0,0
23	0,0	0,0	66,6	379,9	-19,3	0,0
24	0,0	0,0	64,9	516,7	-25,4	0,0

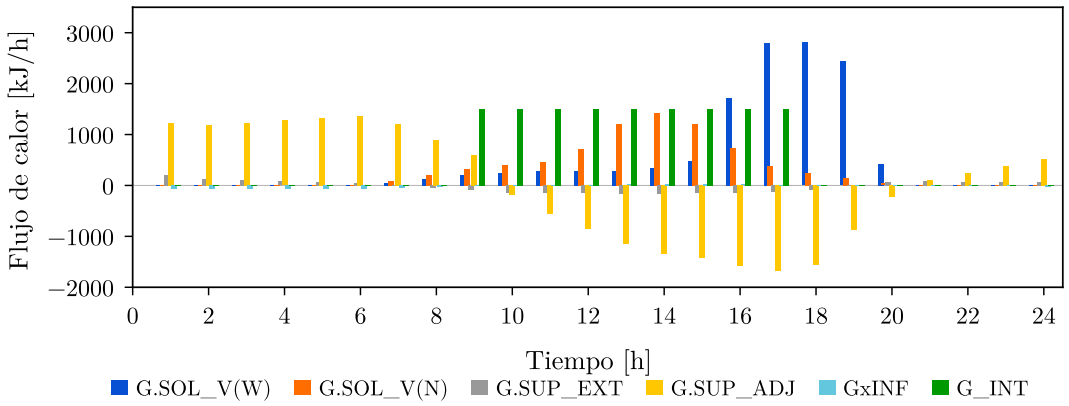


Figura 7.3 Flujos de calor hacia la Oficina Principal por componente durante un día de verano – modelo pasivo con ocupación.

Del análisis de estos datos se desprende lo siguiente:

Dominio de la carga solar vespertina (fachada oeste)

El gráfico revela que la radiación solar transmitida a través de la ventana oeste (G.SOL_V(W)) es, por amplio margen, la carga térmica dominante. Su aporte comienza a incrementarse aceleradamente a partir del mediodía, alcanzando un máximo cercano a los 2.800 [kJ/h] (aprox. 780 [W]) entre las 17:00 y 18:00 horas. Este comportamiento confirma que la orientación poniente es el punto crítico de la envolvente, responsable del sobrecalentamiento tardío de la oficina. En contraste, la ventana norte (G.SOL_V(N)) tiene un impacto menor y más temprano, con un máximo de 1.400 [kJ/h] (aprox. 390 [W]) hacia las 14:00 horas.

Aporte base de las Ganancias Internas

Las ganancias internas por ocupación y equipos (G_INT) actúan como una carga base constante de 1.500 [kJ/h] (aprox. 420 [W]) durante el horario laboral (9:00 a 18:00 hrs). Si bien su magnitud es significativa durante la jornada —operando como una carga base constante comparativamente relevante frente a los otros aportes—, es un factor predecible y estable, a diferencia de la variabilidad propia de la carga solar.

Comportamiento de la Envolvente Opaca

Es interesante notar que el flujo de calor desde las superficies opacas adyacentes (G.SUP_ADJ) y exteriores (G.SUP_EXT) es negativo o cercano a cero durante las horas de mayor insolación. Esto indica que la masa térmica de la estructura absorbe calor del aire interior (enfriamiento pasivo) durante gran parte del día,

y solo comienza a liberarlo hacia el interior (valores positivos) hacia el final de la tarde y noche, retrasando la carga térmica por conducción (inercia térmica).

En resumen, la demanda de climatización es fundamentalmente solar y vespertina, impulsada por la ganancia directa en la fachada oeste, sobre una base constante de calor interno. Este perfil de carga define el escenario crítico de diseño, concentrando la mayor demanda energética hacia el final de la jornada laboral, lo que implica que el sistema de climatización y almacenamiento deberá tener la capacidad suficiente para cubrir el *peak* de demanda justamente en la etapa final de su ciclo de descarga.

7.3. Desempeño del sistema HVAC+TES

Una vez ya estudiada la demanda térmica, se evalúa la respuesta dinámica del modelo al integrar el sistema de climatización propuesto (Bomba de Calor + TES + *Fan-Coil*). Se analiza la capacidad del sistema de mantener las condiciones de confort térmico, y se verifica la efectividad de la estrategia de "Almacenamiento Total" (*Full Storage*).

7.3.1. Control del confort higrotérmico

Para validar la efectividad del sistema, se compara el comportamiento higrotérmico de la Oficina Principal con y sin el sistema de climatización propuesto. El análisis abarca las primeras 300 horas de un año tipo, focalizándose exclusivamente en las horas de ocupación (09:00 a 18:00 hrs.) correspondientes a los 10 días hábiles del periodo.

La Figura 7.4 presenta diagramas de dispersión que correlacionan la temperatura de bulbo seco y la humedad relativa del aire interior de la oficina. En ambos gráficos, la franja sombreada delimita la zona de confort objetivo (ASHRAE 55), considerando una temperatura radiante media en torno a 27 °C, una baja velocidad de circulación de aire (aprox. 0,3 [m/s]), un índice de vestimenta de 0,75 [clo], y un nivel de actividad de 1,2 [met].

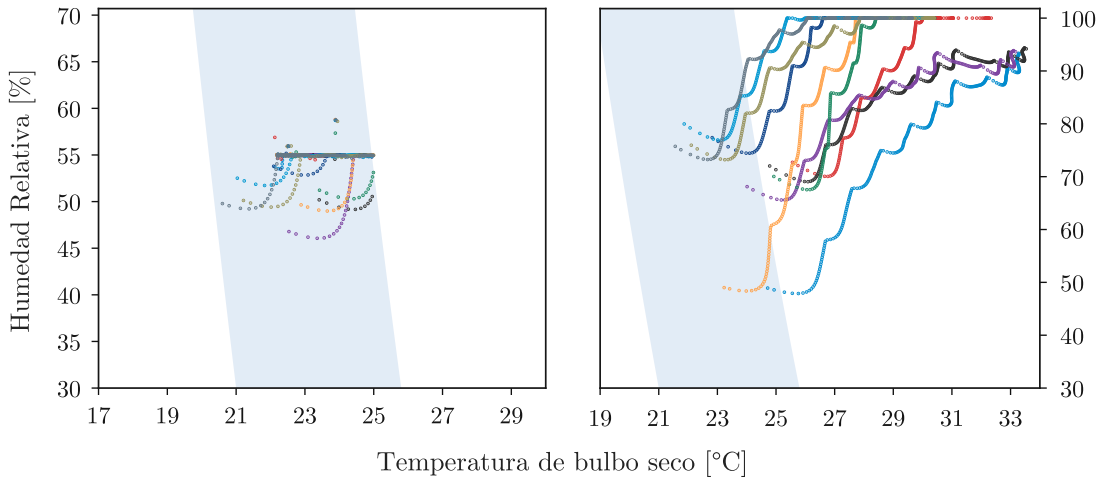


Figura 7.4 Situación de confort térmico en horario laboral – (10 días hábiles). Comparación entre modelo con HVAC+TES (izquierda) vs. modelo pasivo (derecha)

La simulación del modelo pasivo revela condiciones críticas, con *peaks* de temperatura en torno a 34 °C y máximos de humedad que bordean la saturación, situando el espacio en disconfort térmico "acalorado" durante las tardes. Con la activación del sistema HVAC, los puntos de operación se concentran dentro de la franja de confort. Esto confirma que su capacidad de enfriamiento es suficiente para compensar la carga sensible máxima, mientras que el efecto deshumidificador controla eficazmente la humedad relativa, eliminando el riesgo de sensación de bochorno asociado a la carga latente de ocupación.

7.3.2. Dinámica Operacional del Sistema TES

La evaluación de la estrategia de desplazamiento de carga se sustenta en el análisis del comportamiento de los equipos y la evolución térmica del tanque de almacenamiento. La Figura 7.5 ilustra esta dinámica operacional para la ventana de simulación de 300 horas (12 días) para año meteorológico típico (TMY) de TRNSYS. En ella, se superponen las curvas de temperatura promedio —oficina principal (línea azul) y tanque (línea roja)— con los ciclos activos: franjas anaranjadas para la carga (Bomba de Calor) y azules para la descarga (*Fan-Coil*).

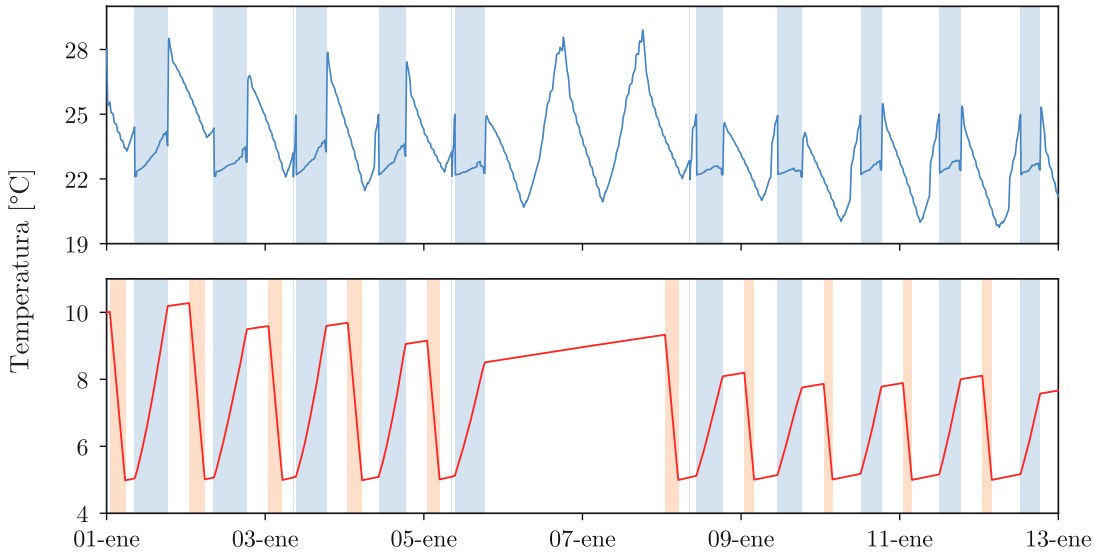


Figura 7.5 Perfiles de temperatura: oficina principal (línea azul), tanque de almacenamiento (línea roja) – y ciclos de actividad: franjas anaranjadas (Carga – Bomba de Calor) y azules (Descarga – *Fan-Coil*).

Del análisis gráfico se desprenden tres validaciones clave:

Ciclo de Carga Nocturna

Las franjas anaranjadas confirman que la generación de frío ocurre exclusivamente en horario nocturno. En cada ciclo, el sistema reduce la temperatura del tanque desde el estado residual del día anterior hasta el setpoint de 5 °C, asegurando la disponibilidad total de energía al inicio de la jornada.

Ciclo de Descarga y Control

Durante los periodos de ocupación, el *Fan-Coil* (franjas azules) opera bajo demanda para estabilizar la temperatura de la oficina dentro de la banda de confort, amortiguando la oscilación térmica. Esto contrasta con el comportamiento libre observado durante el fin de semana (días 7 y 8), donde la temperatura interior escala hasta valores cercanos a los 28 °C incluso en ausencia de ocupación (carga interna nula).

Suficiencia del Almacenamiento

El perfil térmico del tanque demuestra su suficiencia para cumplir con la demanda modelada. Al finalizar cada jornada de descarga, la temperatura del agua asciende, pero se mantiene bajo los 11 °C, confirmando que el volumen de 1.500 litros es capaz de sostener la demanda diaria completa sin comprometer la capacidad de enfriamiento. Adicionalmente, durante el fin de semana se observa una pendiente suave de calentamiento del agua en reposo, atribuible a las pérdidas térmicas estáticas a través del aislamiento del tanque, las cuales no comprometen la operación del lunes siguiente.

7.4. Análisis energético y eficiencia

Tras validar la capacidad del sistema para mantener las condiciones de confort en la oficina, se procede a la evaluación cuantitativa de la estrategia de gestión energética. Esta sección analiza el impacto del desplazamiento de carga y determina la eficiencia global del ciclo de almacenamiento.

7.4.1. Desplazamiento y Recorte de Carga Eléctrica

El objetivo de la estrategia de "Almacenamiento Total" es desacoplar el consumo eléctrico de la generación de frío. Para visualizar este efecto, se compara el perfil de potencia eléctrica real del sistema propuesto frente a la demanda equivalente de un sistema convencional.

La Figura 7.6 presenta este contraste para el día crítico de diseño:

- **Perfil de Demanda Convencional (Línea naranja punteada)**: Representa la potencia eléctrica que habría requerido un sistema tradicional (*chiller* directo) para abatir la carga en tiempo real.
- **Perfil de Consumo Eléctrico con TES (Área azul)**: Representa el consumo eléctrico efectivo del sistema HVAC+TES (Bomba de Calor + Auxiliares + *Fan-Coil* + Deshumidificador ideal).

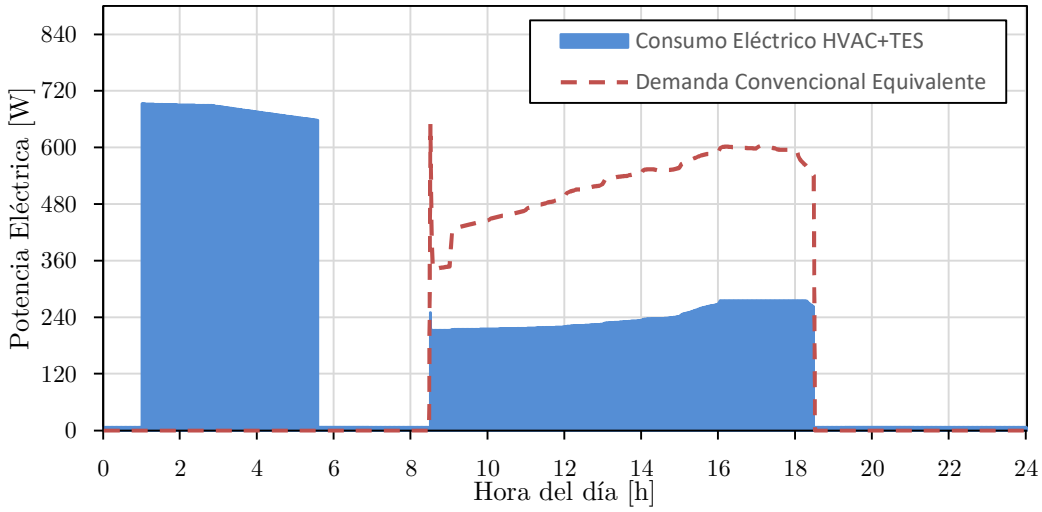


Figura 7.6 Desplazamiento de Carga Eléctrica – día crítico de diseño

Del análisis del gráfico se desprenden dos cuestiones fundamentales sobre la gestión de la demanda energética:

1. **Desplazamiento de la Generación Térmica**: El consumo energético intensivo, correspondiente a la operación del compresor de la Bomba de Calor, se confina exitosamente al bloque nocturno (01:00 - 06:00 hrs). En este periodo se concentra la mayor potencia (aprox. 700 [W]) en potenciales condiciones de tarifa valle y una menor temperatura ambiente.
2. **Recorte de Potencia en Hora Punta (Peak Shaving)**: Durante el horario de operación (08:30 - 18:30 hrs), el sistema convencional habría generado un *peak* de demanda creciente, alcanzando máximos cercanos a los 650 [W] a media tarde. En contraste, el sistema con TES mantiene un perfil de consumo plano y acotado, oscilando en torno a los 240 [W]. Es importante notar que este consumo diurno residual no corresponde a generación de frío (la cual es pasiva desde el tanque), sino mayoritariamente a la operación del deshumidificador (aprox. 180 [W])

necesario para el control de carga latente, sumado al consumo marginal de las bombas de circulación y ventilador.

Cabe mencionar que estas cifras corresponden a un supuesto de eficiencia conservador con relación al deshumidificador independiente. El Fan-Coil (Type 52a) deshumidifica de forma parcial el aire de suministro, pero su contribución resulta insuficiente —por sí sola— para llevar la humedad relativa del ambiente por debajo del 55%. El remanente de deshumidificación se incorporó asumiendo un factor de energía de ~1,15 L/kWh (Tabla 6.1) sustancialmente menor al desempeño energético equivalente de la Bomba de Calor.

Aun considerando la elevada carga activa auxiliar, el sistema logra reducir la demanda de potencia en hora punta en más de un 60% respecto al caso base, aliviando significativamente el estrés sobre la red eléctrica en los horarios de mayor saturación.

Cuantificación del Desplazamiento

Integrando los valores de energía para el día crítico de diseño, la distribución de consumo se detalla en la Tabla 7.2.

Tabla 7.2 Distribución del consumo energético del sistema durante el día crítico (24 h)

Periodo Tarifario	**Energía Consumida** [kWh]	**% del Total**
Horario Valle (22:00 - 08:00)	3,17	**57%**
Horario Punta/Día (08:00 - 22:00)	2,42	**43%**
TOTAL	5,59	**100%**

Los resultados indican que, pese a la necesidad de deshumidificación activa diurna, una proporción mayoritaria de la energía total (57%) es consumida en horario valle.

7.4.2. **Balance Global y Eficiencia (SPF)**

Finalmente, se evalúa la eficiencia termodinámica del sistema completo mediante el Factor de Desempeño Estacional (SPF). Este indicador considera no solo la eficiencia del generador, sino todas las penalizaciones energéticas por bombeo, ventilación, deshumidificación y pérdidas térmicas del tanque.

La Tabla 7.3 resume el balance energético acumulado para el periodo de evaluación (300 horas).

Tabla 7.3 Balance de Energía y Rendimiento del Sistema (300 hrs.)

Ítem	**Energía Acumulada [kWh]**
(A) Energía Térmica Extraída por el *Fan-Coil* ($\sum Q_{FC}$)	57,25
(B) Energía Térmica Total Almacenada BdeC → TES ($\sum Q_{TES}$)	70,31
Pérdidas Térmicas del Tanque (B - A)	13,07
(A') Energía Térmica Latente Extraída por Deshumidificación ($\sum Q_{deshum}$)	11,42
Energía Térmica Total Extraída (A + A') ($\sum Q_{útil}$)	68,67
(C) Consumo Eléctrico BdeC ($\sum W_{BC}$)	23,44
(D) Consumo Eléctrico Auxiliares ($\sum W_{aux}$) *(Bombas + Ventilador + Deshumidificador)*	20,67
Consumo Eléctrico Total (C + D) ($\sum W_{total}$)	44,11
Eficiencia de Almacenamiento (η_{TES}) ((A / B)×100%)	**81,4%**
SPF del Sistema ($\sum Q_{útil}/\sum W_{total}$)	**1,56**

Del balance energético se desprenden dos indicadores de eficiencia para comentar:

Eficiencia de Almacenamiento (η_{TES})

La relación entre la energía útil extraída de la oficina principal por el *Fan-Coil* y la energía "generada" por la bomba de calor y almacenada en el tanque se sitúa en un 81,4%.

$$\eta_{\mathrm{TES}} = \frac{\sum Q_{\mathrm{FC}}}{\sum Q_{\mathrm{TES}}} \cong 0{,}814 \tag{7.1}$$

Este valor indica que las pérdidas térmicas del tanque representan cerca del 19% de la energía generada. Si bien es un porcentaje considerable, es consistente con sistemas de almacenamiento de pequeña escala donde la relación superficie/volumen del tanque es alta, favoreciendo la interacción térmica con el ambiente. Además, se debe considerar que, durante los fines de semana, el tanque continúa perdiendo energía a pesar de la inactividad del sistema.

Factor de Desempeño del Sistema (SPF):

El sistema alcanza un SPF global de 1,56.

$$\mathrm{SPF} = \frac{\text{Energía Térmica Total (Sensible + Latente)}}{\text{Consumo Eléctrico Total}} \tag{7.2}$$

Aunque el SPF simulado es inferior al $\mathtt{COP}_{\mathtt{R}}$ nominal típico de un *chiller* o bomba de calor en modo frío (habitualmente $> 3{,}0$), este factor refleja la realidad operativa completa. La caída en el rendimiento se explica principalmente por los consumos auxiliares (de los cuales el deshumidificador idealizado explica la mayor parte bajo el supuesto conservador de eficiencia adoptado), que representan casi el 47% del consumo eléctrico total (20,67 kWh de auxiliares frente a 23,44 kWh de la bomba de calor) e incluyen el costo energético del control de humedad, el bombeo y el transporte hidráulico, además de las pérdidas térmicas del almacenamiento.

Esta penalización se compensa parcialmente por la mejora en el rendimiento de generación nocturna al operar la bomba de calor de madrugada, cuando la menor temperatura exterior favorece el ciclo de compresión. No obstante, el SPF depende también de los parámetros de ficha técnica de los equipos comerciales, por lo que variaciones en la selección del equipamiento disponible podrían modificar directamente el desempeño energético reportado.

En definitiva, aunque el sistema presenta un SPF inferior al de un equipo de expansión directa convencional debido a la carga de los sistemas auxiliares, esa diferencia es el *trade-off* de modificar el perfil de consumo del edificio, lo que otorga la capacidad estratégica de gestión sobre la demanda.

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES

8.1. Conclusiones Generales

Esta investigación desarrolló y validó un modelo computacional de un edificio en TRNSYS 17, representando con precisión el comportamiento térmico de una de sus oficinas. El proceso de calibración y posterior validación sobre ventanas de datos independientes muestran una alta fidelidad predictiva del modelo frente a los datos medidos: en la etapa de validación se obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) de 0,965 y un RMSE de 0,492 °C para la temperatura del aire interior, y un R^2 de 0,630 y un RMSE de 4,66 %HR para la humedad relativa, lo que establece una base confiable para evaluaciones energéticas.

Sobre esta plataforma validada, se evaluó la factibilidad técnica de un Sistema de Climatización con Almacenamiento Térmico (TES). Los resultados confirman que la estrategia de "Almacenamiento Total" permite desacoplar efectivamente la generación de frío de su consumo, transformando el perfil de demanda del recinto desde una curva comercial típica hacia un esquema de carga valle.

Si bien la incorporación del almacenamiento y auxiliares conlleva una penalización en la eficiencia global del sistema —reflejada en un SPF de 1,56—, esta se compensa con beneficios estratégicos en la gestión de la demanda: reducción de más del 60% de la potencia en hora punta (*peak shaving*) y alivio

de la red eléctrica en períodos de alta demanda; validando su potencial como alternativa técnicamente viable para la climatización de oficinas.

8.2. Conclusiones Específicas

Respecto a la calibración y validación térmica: El proceso de calibración manual, que minimizó los indicadores de error de temperatura y humedad relativa en las distintas zonas térmicas del edificio, permitió ajustar el modelo computacional a la respuesta real medida en terreno. Su validación posterior confirmó una alta fidelidad predictiva: para la Oficina Principal, el modelo alcanzó un coeficiente de determinación (R^2) de 0,965 y un RMSE de 0,492 °C en temperatura, y de 0,630 y 4,66 %HR, respectivamente, en humedad relativa, respaldando su aptitud para la simulación energética.

Respecto al factor de desempeño y deshumidificador ideal: Si bien la simulación asumió una demanda eléctrica por extracción latente continua (deshumidificador) de 180 [W] eléctricos para mantener la humedad relativa bajo el 55%, es importante notar que esta magnitud corresponde a un supuesto de cálculo conservador: el Fan-Coil deshumidifica una fracción real de la carga, y el remanente —cubierto por un componente idealizado— se incorporó asumiendo una eficiencia energética muy inferior a la de la Bomba de Calor del sistema. De acercarse dicha eficiencia a la de la Bomba de Calor (por ejemplo, si el proceso de condensación ocurriera en su totalidad en el serpentín del Fan-Coil), el desempeño global del sistema (SPF) superaría el valor reportado.

Respecto al desempeño del sistema de almacenamiento (TES): El dimensionamiento del tanque de inercia en 1.500 litros resultó ser adecuado

para la demanda modelada. La simulación verificó que este volumen es capaz de abatir la carga térmica del día crítico de diseño sin agotar la reserva fría. La eficiencia de almacenamiento (η_{TES}) alcanzó un 81,4%, indicando que las pérdidas térmicas estáticas, aun siendo considerables, son manejables y no comprometen la operatividad del sistema.

Respecto al impacto energético y la red eléctrica: La estrategia de gestión de demanda cumple su propósito fundamental de desacoplar el consumo de la generación de frío:

1. **Recorte de Punta**: Se logró reducir la potencia eléctrica en horario punta en más del 60% respecto a un sistema convencional equivalente.
2. **Desplazamiento de Carga**: Se consiguió trasladar el 57% de la energía total consumida al horario valle (nocturno). Este desplazamiento es sensible al supuesto de eficiencia del deshumidificador independiente: bajo un escenario de rendimiento más favorable para este proceso, la fracción de energía desplazada a horario valle aumentaría considerablemente.

8.3. Proyecciones y Trabajos Futuros

Para dar continuidad a esta línea de investigación, se identifican las siguientes áreas de desarrollo complementario y futuro:

Cobertura estacional de la validación: Realizar campañas complementarias de medición de variables higrotérmicas en invierno y en estaciones intermedias, con el fin de ampliar la base de datos para las etapas de calibración y validación, y extender la capacidad predictiva del modelo a todo el año.

Optimización de la estrategia de control: Explorar la implementación de Control Predictivo basado en Modelos (MPC) integrando pronósticos meteorológicos para optimizar la carga del tanque y evitar enfriamientos innecesarios.

Integración con energías renovables (PV): Estudiar la sinergia entre el sistema TES y la generación fotovoltaica, evaluando estrategias de "carga solar a mediodía" para utilizar el tanque como batería térmica de excedentes solares.

Incorporación de materiales avanzados (PCM/TCES): Investigar el uso o aplicación de otros materiales de almacenamiento térmico. Su implementación podría reducir significativamente el volumen de almacenamiento requerido, las pérdidas, y mejorar los índices de eficiencia.

Análisis comparativo TES vs. baterías eléctricas (BESS): Evaluar técnica y económicamente la competitividad del almacenamiento térmico frente al almacenamiento eléctrico directo (Baterías de Ion-Litio). Sería relevante determinar en qué escenarios resulta más conveniente almacenar "calor o frío" (TES) versus almacenar "carga eléctrica" para alimentar la bomba de calor posteriormente, considerando variables como la eficiencia *round-trip*, vida útil y costos de inversión por kWh desplazado.

Escalamiento, implementación y evaluación técnico-económica: Llevar el sistema HVAC+TES teórico a una configuración comercialmente realista, mediante la selección de equipos disponibles en el mercado y el diseño de una arquitectura implementable. Posteriormente, evaluar el sistema —en simulación detallada o mediante una implementación piloto— con un análisis de costo de ciclo de vida que considere CAPEX y OPEX bajo tarifas con discriminación horaria (por ejemplo, BT4.3), determinando el periodo de retorno de la inversión y las condiciones bajo las cuales el sistema resulta competitivo.

REFERENCIAS

[1] International Energy Agency (IEA), *World Energy Outlook 2024*. París, Francia, 2024.

[2] Ministerio de Energía, *Balance Nacional de Energía 2023*, Gobierno de Chile, Santiago, Chile, 2024.

[3] Corporación de Desarrollo Tecnológico (CDT), *Informe Final: Estudio de Usos de la Energía en los Hogares de Chile*, Ministerio de Energía, Santiago, Chile, 2019.

[4] Ministerio de Energía, *Política Energética Nacional: Actualización 2022*, Gobierno de Chile, Santiago, Chile, 2022.

[5] ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers), *2017 ASHRAE Handbook—Fundamentals*. Atlanta, GA, EE. UU.: ASHRAE, 2017.

[6] Y. A. Çengel y M. A. Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach*, 8.ª ed. Nueva York, NY, EE. UU.: McGraw-Hill Education, 2015.

[7] J. A. Duffie y W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4.ª ed. Hoboken, NJ, EE. UU.: John Wiley & Sons, 2013.

[8] Y. A. Çengel y A. J. Ghajar, *Transferencia de calor y masa: fundamentos y aplicaciones*, 4.ª ed. México D. F.: McGraw-Hill, 2011.

[9] Centro de Investigación en Tecnologías de la Construcción (CITEC UBB) y Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU), *Manual de Hermeticidad al Aire de Edificaciones*. Concepción, Chile, 2014.

[10] International Organization for Standardization, *Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*, ISO 7730:2005, Ginebra, Suiza, 2005. [En línea]. Disponible en: https://www.iso.org/standard/39155.html

[11] F. Manzano-Agugliaro, F. G. Montoya, A. Sabio-Ortega, y A. García-Cruz, «Review of bioclimatic architecture strategies for achieving thermal comfort», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 49, pp. 736-755, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.04.095.

[12] A. Arteconi, N. J. Hewitt, y F. Polonara, «State of the art of thermal storage for demand-side management», *Appl. Energy*, vol. 93, pp. 371-389, 2012.

[13] T. J. C. Santos, J. M. T. Farinha, M. Mendes, y J. Monteiro, «Thermal Energy Storage in Renewable Energy Communities: A State-of-the-Art Review», *Energies*, vol. 19, n.º 5, p. 1363, mar. 2026, doi: 10.3390/en19051363.

[14] I. Sârbu y C. Sebarchievici, «A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage», *Sustainability*, vol. 10, n.º 1, p. 191, ene. 2018, doi: 10.3390/su10010191.

[15] E. J. Sarabia Escrivà, «Cálculo de sombras en programas de simulación térmica de edificios», Tesis Doctoral, Dept. Termodinámica Aplicada, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, 2010.

[16] A. Shahcheraghian, H. Madani, y A. Ilinca, «From White to Black-Box Models: A Review of Simulation Tools for Building Energy Management and Their Application in Consulting Practices», *Energies*, vol. 17, n.º 2, p. 376, ene. 2024, doi: 10.3390/en17020376.

[17] H. Zhao y F. Magoulès, «A review on the prediction of building energy consumption», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, n.º 6, pp. 3586-3592, 2012, doi: 10.1016/j.rser.2012.02.049.

[18] L. Wang, G. Li, J. Gao, X. Fang, C. Wang, y C. Xiong, «Case Study: Impacts of Air-Conditioner Air Supply Strategy on Thermal Environment and Energy Consumption in Offices Using BES–CFD Co-Simulation», *Sensors*, vol. 23, n.º 13, p. 5958, jun. 2023, doi: 10.3390/s23135958.

[19] A. C. Megri y F. Haghighat, «Zonal modeling for simulating indoor environment of buildings: Review, recent developments, and applications», *HVAC&R Res.*, vol. 13, n.º 6, pp. 887-905, 2007, doi: 10.1080/10789669.2007.10391461.

[20] Z. Wang y R. S. Srinivasan, «A review of artificial intelligence based building energy use prediction: Contrasting the capabilities of single and ensemble prediction models», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 75, pp. 796-808, ago. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.10.079.

[21] M. Nawar, M. Shomer, S. Faddel, y H. Gong, «Transfer Learning in Deep Learning Models for Building Load Forecasting: Case of Limited Data», arXiv:2301.10663, 2023, doi: 10.48550/arXiv.2301.10663.

[22] X. Li y J. Wen, «Review of building energy modeling for control and operation», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 37, pp. 517-537, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.05.056.

[23] L. A. Bisogno Bernardini, J. H. Kämpf, U. Desideri, F. Leccese, y G. Salvadori, «Grey-Box RC Building Models for Intelligent Management of Large-Scale Energy Flexibility: From Mass Modeling to Decentralized Digital Twins», *Energies*, vol. 19, n.º 1, p. 77, dic. 2025, doi: 10.3390/en19010077.

[24] R. Judkoff y J. Neymark, «International Energy Agency Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic Method», National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO, EE. UU., Inf. NREL/TP-472-6231, 1995.

[25] R. Roka, A. Figueiredo, A. Vieira, y C. Cardoso, «A Systematic Review of Sensitivity Analysis in Building Energy Modeling: Key Factors Influencing Building Thermal Energy Performance», *Energies*, vol. 18, n.º 9, p. 2375, may. 2025, doi: 10.3390/en18092375.

[26] D. Coakley, P. Raftery, y M. Keane, «A review of methods to match building energy simulation models to measured data», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 37, pp. 123-141, sep. 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.05.007.

[27] ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers), *ASHRAE Guideline 14-2014: Measurement of Energy, Demand, and Water Savings*. Atlanta, GA, EE. UU.: ASHRAE, 2014.

[28] I. Sarna, J. Ferdyn-Grygierek, y K. Grygierek, «Thermal Model Validation Process for Building Environment Simulation: A Case Study for Single-Family House», *Atmosphere*, vol. 13, n.º 8, p. 1295, ago. 2022, doi: 10.3390/atmos13081295.

[29] Y. Lu, Z. Chen, S. Hu, y J. Liu, «Integration of airflow zonal model and building energy simulation for large space buildings», *E3S Web Conf.*, vol. 356, p. 04024, 2022, doi: 10.1051/e3sconf/202235604024.

[30] D. Mazzeo, N. Matera, C. Cornaro, G. Oliveti, P. Romagnoni, y L. De Santoli, «EnergyPlus, IDA ICE and TRNSYS predictive simulation accuracy for building thermal behaviour evaluation by using an experimental campaign in solar test boxes with and without a PCM module», *Energy Build.*, vol. 212, p. 109812, abr. 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.109812.

[31] L. Phiri, T. O. Olwal, y T. E. Mathonsi, «A Comprehensive Review of Data-Driven and Physics-Based Models for Energy Performance in Non-Domestic Buildings», *Energies*, vol. 18, n.º 24, p. 6481, dic. 2025, doi: 10.3390/en18246481.

[32] N. Ahmed, Y. Ding, G. Canti, y N. Anglani, «Sustainable building's energy management with artificial intelligence and machine learning: A decadal scoping review (2014–2024)», *Energy Rep.*, vol. 15, p. 109082, jun. 2026, doi: 10.1016/j.egyr.2026.109082.

[33] M. Magni, F. Ochs, S. De Vries, A. Maccarini, y F. Sigg, «Detailed cross comparison of building energy simulation tools results using a reference office building as a case study», *Energy Build.*, vol. 250, p. 111260, nov. 2021, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111260.

[34] C. Cornaro, F. Bosco, M. Lauria, V. A. Puggioni, y L. De Santoli, «Effectiveness of Automatic and Manual Calibration of an Office Building Energy Model», *Appl. Sci.*, vol. 9, n.º 10, p. 1985, may. 2019, doi: 10.3390/app9101985.

[35] H. Johra, M. Schaffer, G. Chaudhary, H. S. Kazmi, J. Le Dréau, y S. Petersen, «What metrics does the building energy performance community use to compare dynamic models?», en *Proc. 18th IBPSA Conf. (Building Simulation 2023)*, Shanghái, China, sep. 2023, doi: 10.26868/25222708.2023.1309.

[36] S. Maximov, «Thermal energy storage for renewable integration: a techno-economic analysis in the Chilean energy context», Tesis Doctoral (PhD), The University of Edinburgh, Edimburgo, Reino Unido, 2022.

[37] A. Karim, A. Burnett, y S. Fawzia, «Investigation of Stratified Thermal Storage Tank Performance for Heating and Cooling Applications», *Energies*, vol. 11, n.º 5, p. 1049, abr. 2018, doi: 10.3390/en11051049.

[38] M. A. Abd Majid, M. Muhammad, C. C. Hampo, y A. B. Akmar, «Analysis of a Thermal Energy Storage Tank in a Large District Cooling System: A Case Study», *Processes*, vol. 8, n.º 9, p. 1158, sep. 2020, doi: 10.3390/pr8091158.

[39] W. Tipasri, A. Suksri, K. Velmurugan, y T. Wongwuttanasatian, «Energy Management for an Air Conditioning System Using a Storage Device to Reduce the On-Peak Power Consumption», *Energies*, vol. 15, n.º 23, p. 8940, nov. 2022, doi: 10.3390/en15238940.

[40] J. Karwacki, «Cooling System with PCM Storage for an Office Building: Experimental Investigation Aided by a Model of the Office Thermal Dynamics», *Materials*, vol. 14, n.º 6, p. 1356, mar. 2021, doi: 10.3390/ma14061356.

[41] P. Palensky y D. Dietrich, «Demand Side Management: Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads», *IEEE Trans. Ind. Inform.*, vol. 7, n.º 3, pp. 381-388, 2011.

[42] A. I. Jofré Escárate, «Gestión de demanda en edificios en el contexto de la Ley 21.305 sobre eficiencia energética», Memoria para optar al título de Ingeniera Civil Eléctrica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2022. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/186654

[43] R. Yin *et al.*, «Comparing simulated demand flexibility against actual performance in commercial office buildings», *Build. Environ.*, vol. 243, p. 110663, sep. 2023, doi: 10.1016/j.buildenv.2023.110663.

[44] J. A. de Chalendar, C. McMahon, L. Fuentes Valenzuela, P. W. Glynn, y S. M. Benson, «Unlocking demand response in commercial buildings: Empirical response of commercial buildings to daily cooling set point adjustments», *Energy Build.*, vol. 278, p. 112599, ene. 2023, doi: 10.1016/j.enbuild.2022.112599.

[45] A. Ondó Oná-Ayécaba, M. Alcázar-Ortega, J. F. Urchueguia, B. Badenes-Badenes, E. Guilló-Sansano, y Á. Martínez-Ponce, «Evaluation of Technical Constraints Management in a Microgrid Based on Thermal Storage Applications by Modeling with OpenDSS», *Appl. Sci.*, vol. 15, n.º 24, p. 13088, dic. 2025, doi: 10.3390/app152413088.

[46] H. Luo, W. Ge, J. Sun, Q. Jiang, y Y. Gong, «Using Thermal Energy Storage to Relieve Wind Generation Curtailment in an Island Microgrid», *Energies*, vol. 14, n.º 10, p. 2851, may. 2021, doi: 10.3390/en14102851.

[47] Departamento de Física, Universidad de Santiago de Chile (USACH), «Registro histórico de variables meteorológicas: Estación Central», Laboratorio de Óptica y Ambiente, 2017. [En línea]. Disponible en: http://ambiente.usach.cl/meteo/datos.html

[48] Ministerio de Energía, Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile y GIZ, «Campaña de medición del recurso eólico y solar — Estación Cerro Calán, registros de 10 min, enero–febrero de 2017», 2017. [En línea]. Disponible en: http://walker.dgf.uchile.cl/Mediciones

[49] Gemini Data Loggers, «Tinytag Plus High Resolution Range G, modelo TG12-0017: Hoja técnica», ed. 3, ene. 2000. [En línea]. Disponible en: https://bmc.de/datenblaetter/tg120017.pdf

[50] Gemini Data Loggers, «Tinytag Plus Relative Humidity Logger, modelo TGP-0304: Manual técnico». [En línea]. Disponible en: https://docs.rs-online.com/be9d/0900766b8002c8ba.pdf

[51] Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, *TRNSYS 17: A Transient System Simulation Program — Volume 4: Mathematical Reference*. Madison, WI, EE. UU., 2017.

[52] Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, *TRNSYS 17: A Transient System Simulation Program — Volume 5: Multizone Building Modeling with Type56 and TRNBuild*. Madison, WI, EE. UU., 2017.

[53] D. M. Hamby, «A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models», *Environ. Monit. Assess.*, vol. 32, n.º 2, pp. 135-154, 1994, doi: 10.1007/BF00547132.

ANEXOS

Anexo A:

Ecuación de Confort de Fanger

El Voto Medio Estimado (PMV) es un índice que predice el valor medio de los votos de sensación térmica de un gran grupo de personas en una misma escala. El modelo de Fanger calcula este índice basándose en el balance térmico del cuerpo humano.

La ecuación general definida en la norma ISO 7730 es la siguiente:

$$PMV = [0{,}303 \cdot e^{-0{,}036 \cdot M} + 0{,}028] \cdot L$$

Donde L representa la carga térmica en el cuerpo (diferencia entre la generación interna de calor y la pérdida de calor hacia el ambiente), definida como:

$$\begin{aligned} L = (M - W) \\ & -3{,}05 \cdot 10^{-3} \cdot [5.733 - 6{,}99 \cdot (M - W) - p_a] \\ & -0{,}42 \cdot [(M - W) - 58{,}15] \\ & -1{,}7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5.867 - p_a) \\ & -0{,}0014 \cdot M \cdot (34 - T_a) \\ & -3{,}96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(T_{cl} + 273)^4 - (TRM + 273)^4] \\ & -f_{cl} \cdot h_c \cdot (T_{cl} - T_a) \end{aligned}$$

Variables y Unidades:

- M: Tasa metabólica [W/m²].
- W: Trabajo mecánico externo efectivo [W/m²]. Para la mayoría de las actividades de oficina, se asume $W \approx 0$.
- p_a: Presión parcial de vapor de agua en el aire [Pa].
- T_a: Temperatura del aire [°C].
- TRM: Temperatura radiante media [°C].
- f_{cl}: Factor de área de superficie de la ropa (adimensional).
- T_{cl}: Temperatura de la superficie de la ropa [°C].
- h_c: Coeficiente de transferencia de calor por convección [W/m²K].

La temperatura de la superficie de la ropa (T_{cl}) y el coeficiente de convección (h_c) se determinan mediante un proceso iterativo detallado en la norma.

Fuente: Elaboración propia a partir de UNE-EN ISO 7730:2005 [10] y ASHRAE *Handbook—Fundamentals* [5].

Anexo B:

Planos de Edificio Ingeniería Mecánica

En este anexo se presenta la planimetría correspondiente a las tres plantas del edificio perteneciente al Departamento de Ingeniería Mecánica, facilitada por el profesor Danilo Estay. Estos constituyen la base geométrica utilizada para la definición de las zonas térmicas del modelo de simulación.

Las figuras a continuación detallan la distribución de los recintos en cada nivel:

- Nivel 0: Laboratorio subterráneo de Tecnología Mecánica.
- Nivel 1: Sector de oficinas y pasillo. Aquí se ubica la oficina principal
- Nivel 2: Sala de Proyectos.

A continuación, se adjuntan las vistas en planta de cada nivel:

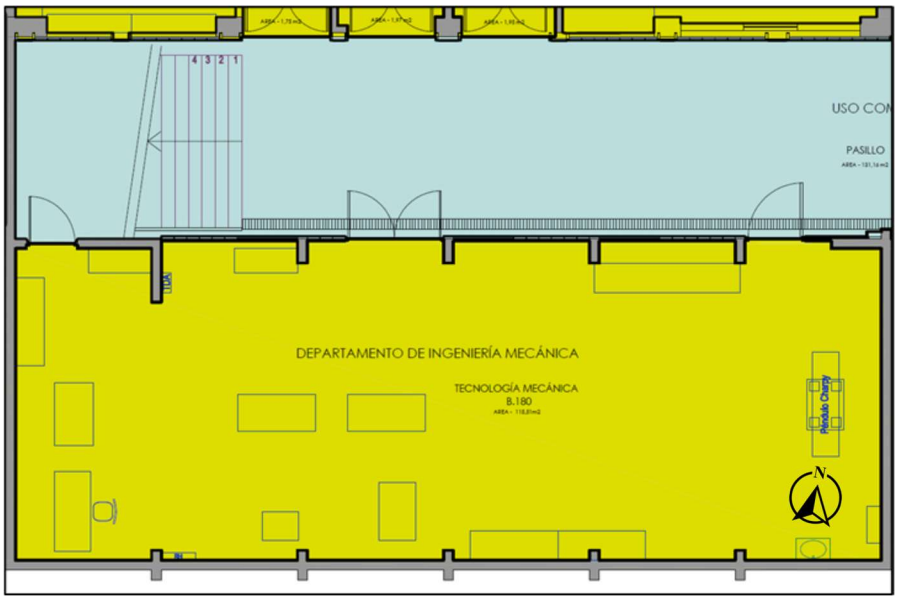


Figura B.1 Planta Arquitectónica Nivel 0. Zona del Laboratorio de Tecnología Mecánica. – Sin Escala

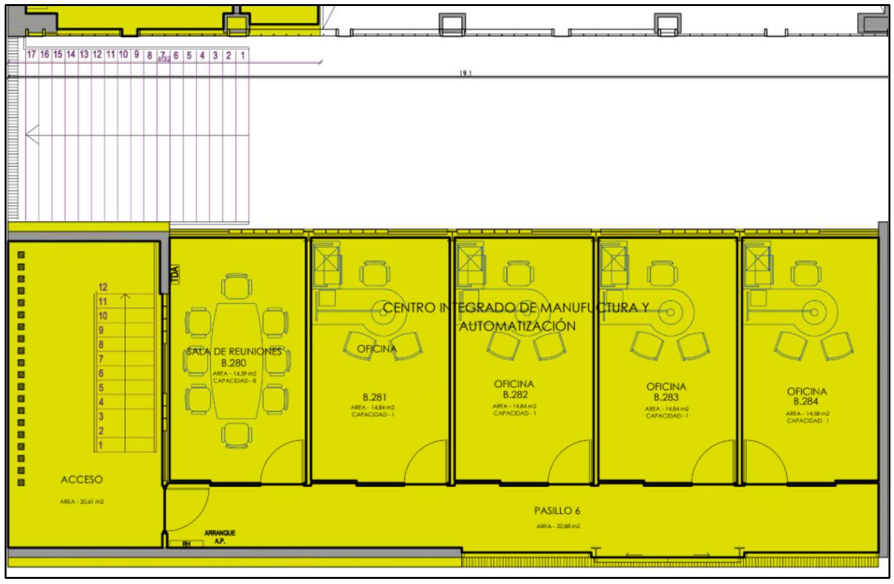


Figura B.2 Planta Arquitectónica Nivel 1. Detalle del sector de oficinas. – Sin Escala

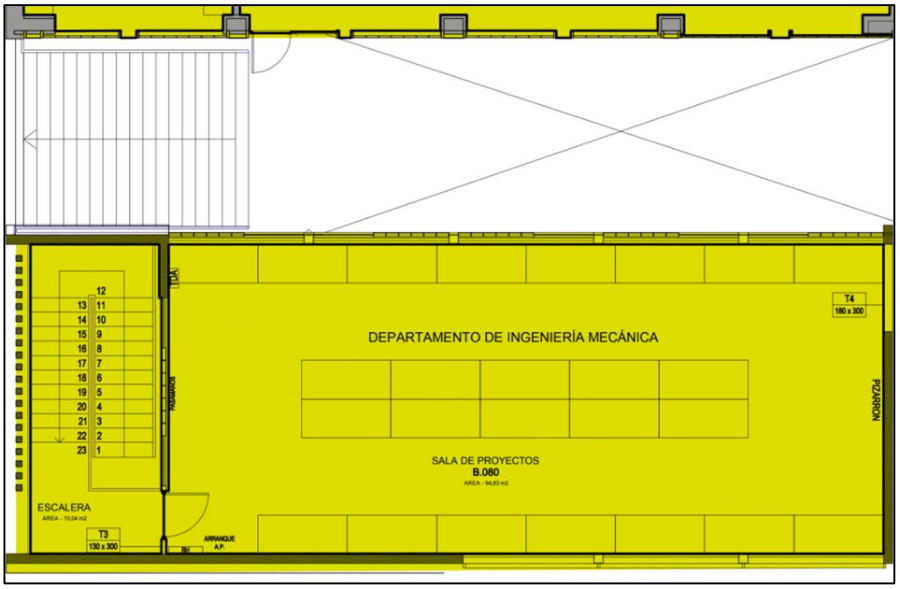


Figura B.3 Planta Arquitectónica Nivel 2. Sala de Proyectos – Sin Escala

Anexo C:

Detalle Capa por Capa de los Cerramientos Opacos

A continuación, se detalla la composición capa por capa (desde la superficie interior hacia la exterior) de cada uno de los cerramientos opacos definidos en TRNBuild y resumidos en la Tabla 4.1 del Capítulo 4.

Tabla C.1 Detalle capa por capa de los cerramientos opacos.
Fuente: elaboración propia a partir de las propiedades de materiales definidas en TRNBuild.

Elemento constructivo (Tabla 4.1)	**Tipo TRNBuild**	**Capa (interior → exterior)**	**Espesor [mm]**	**Conductividad [W/m · K]**	**Densidad [kg/m³]**	**Calor específico [kJ/kg · K]**
Cerramiento exterior estructural	EXT_WALL_ESTE	Yeso cartón	20	0,250	825	1,00
		XPS (poliestireno extruido)	50	0,035	40	1,50
		Hormigón armado	230	2,500	2500	1,00
Cerramiento exterior simple	EXT_WALL	Yeso cartón	15	0,250	825	1,00
		XPS (poliestireno extruido)	45	0,035	40	1,50
		Hormigón en masa	140	1,750	2000	1,00
		Revestimiento de madera	10	0,170	600	1,60
Cerramiento exterior no enlucido	HORMIGON_NO ENLUCIDO	XPS (poliestireno extruido)	40	0,035	40	1,50
		Hormigón en masa	140	1,750	2000	1,00
		Revestimiento de madera	10	0,170	600	1,60
Cielo falso	ADJ_CEILING	Lana mineral	15	0,042	200	0,66
		Panel móvil	5	0,085	540	2,00

Elemento constructivo (Tabla 4.1)	Tipo TRNBuild	Capa (interior → exterior)	Espesor [mm]	Conductividad [W/m · K]	Densidad [kg/m³]	Calor específico [kJ/kg · K]
División aislada entre plantas	DIVISION_PISOS_ESTRUCTURAL	Hormigón armado	150	2,500	2500	1,00
		XPS (poliestireno extruido)	100	0,035	40	1,50
		Hormigón armado	150	2,500	2500	1,00
Muro aislado en contacto con terreno	MURO_TERRENO	Yeso cartón	10	0,250	825	1,00
		Hormigón armado	250	2,500	2500	1,00
		Aislante (resistencia pura, R=7,2 m²K/W)	—	—	—	—
Suelo aislado en contacto con terreno	SUELO_TERRENO	Solado de piedra artificial	50	1,300	1500	1,00
		Hormigón en masa	200	1,750	2000	1,00
		Aislante (resistencia pura, R=7,2 m²K/W)	—	—	—	—
Suelo aislado planta superior	PISOPROYECTOS	Aislante (resistencia pura, R=9,0 m²K/W)	—	—	—	—
		Panel móvil	10	0,085	540	2,00
Tabiquería exterior	EXTERNOMAL AISLADO	Yeso cartón	25	0,250	825	1,00
		Lana mineral	50	0,042	200	0,66
		Yeso cartón	25	0,250	825	1,00
Tabiquería interior	ADJ_WALL	Yeso cartón	20	0,250	825	1,00
		XPS (poliestireno extruido)	50	0,035	40	1,50
		Yeso cartón	20	0,250	825	1,00
Techo aislado	EXT_ROOF	Lana mineral	100	0,042	200	0,66
		Panel móvil	20	0,085	540	2,00

Nota: Las capas marcadas como "Aislante (resistencia pura)" no tienen espesor ni conductividad definidos en TRNBuild: se ingresan directamente como una resistencia térmica (R).

Anexo D:

Coeficientes Empíricos del Modelo de Radiación Difusa de Pérez et al.

A continuación, se presentan los coeficientes empíricos (F_{ij}) del modelo de Pérez et al. (1999) [51], descrito en el Capítulo 4.

Estos coeficientes se determinan en función de la categoría de claridad del cielo (ε_{sky}), la cual clasifica las condiciones atmosféricas en ocho intervalos discretos, desde cielos cubiertos ($\varepsilon_{\text{sky}} = 1$) hasta cielos despejados ($\varepsilon_{\text{sky}} > 6$).

La Tabla D.1 detalla los valores empíricos para los componentes F_{11}, F_{12}, F_{13} (asociados a la radiación circunsolar, $F'1$) y F_{21}, F_{22}, F_{23} (asociados al brillo del horizonte, $F'2$).

Tabla D.1 Coeficientes de brillo reducido para el modelo de Pérez et al. (1999) en función de la claridad del cielo (ε_{sky}) - Fuente: documentados en el Manual TRNSYS 17 [51].

Rango de ε_{sky}	F_{11}	F_{12}	F_{13}	F_{21}	F_{22}	F_{23}
[1,000 - 1,065]	-0,0083	0,5877	-0,0621	-0,0596	0,0721	-0,0220
[1,065 - 1,230]	0,1299	0,6826	-0,1514	-0,0189	0,0660	-0,0289
[1,230 - 1,500]	0,3297	0,4869	-0,2211	0,0554	-0,064	-0,026
[1,500 - 1,950]	0,568	0,187	-0,295	0,109	-0,152	-0,014
[1,950 - 2,800]	0,873	-0,392	-0,362	0,226	-0,462	0,001
[2,800 - 4,500]	1,132	-1,237	-0,412	0,288	-0,823	0,056
[4,500 - 6,200]	1,060	-1,600	-0,359	0,264	-1,127	0,131
$\varepsilon_{\text{sky}} \geq$ 6,200	0,678	-0,327	-0,250	0,156	-1,377	0,251

Anexo E:
Resultados detallados del análisis de sensibilidad por zonas

En este anexo se presentan los resultados gráficos del análisis de sensibilidad local (OAT) para las cuatro zonas térmicas que complementan los resultados principales expuestos en el Capítulo 5.

Para cada zona se incluye un gráfico de dispersión unificado que permite visualizar simultáneamente el impacto de los 35 parámetros sobre las dos variables objetivo.

Simbología de las variables

- Temperatura de bulbo seco (T°): Cuadrados azules (■)
- Humedad Relativa (HR): Triángulos rojos (▲)

Interpretación de los ejes

Las métricas normalizadas en ambos ejes permiten comparar el nivel de sensibilidad de manera adimensional:

- Eje horizontal (NMAE): Representa el impacto total o magnitud media de los cambios puntuales provocados por la variación del parámetro.
- Eje vertical ($\Delta S_{\%}$): Representa el cambio relativo en la variabilidad. Indica en qué medida el parámetro altera la amplitud de la oscilación respecto a la configuración de referencia. Se presenta en escala pseudo-logarítmica (lineal entre 0% y 1%).

Resultados para la Zona “PASILLO”.

A continuación, se presenta el gráfico de sensibilidad para la zona “PASILLO”.

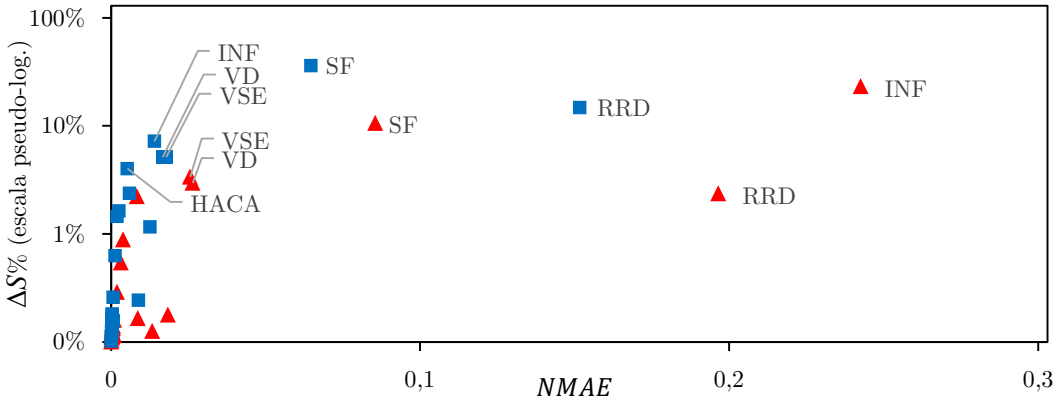


Figura E.1 Resultados del SA sobre HR (triángulos rojos) y T° (cuadrados azules) en ‘PASILLO’

Resultados para la Zona “”.

A continuación, se presenta el gráfico de sensibilidad para la zona “HAB_LAT1” (oficina lateral).

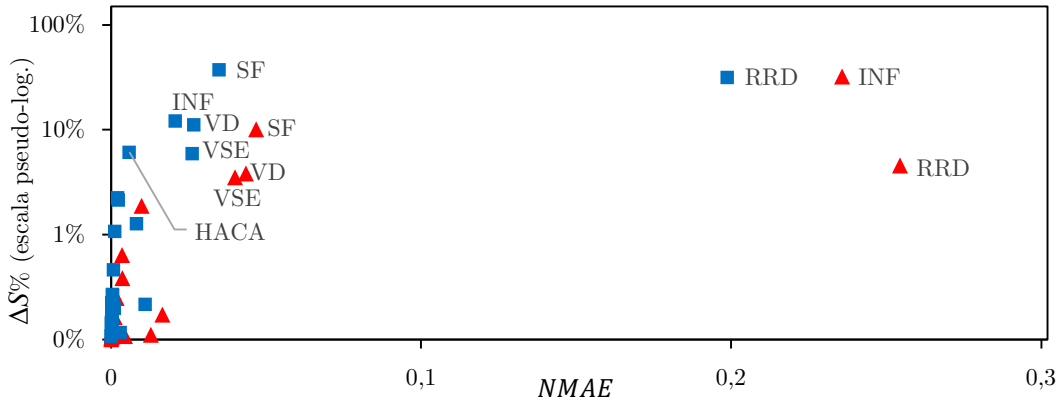


Figura E.2 Resultados del SA sobre HR (triángulos rojos) y T° (cuadrados azules) en ‘HAB_LAT1’

Resultados para la Zona “ENTRE_PISO”.

A continuación, se presenta el gráfico de sensibilidad para la zona “ENTRE_PISO”.

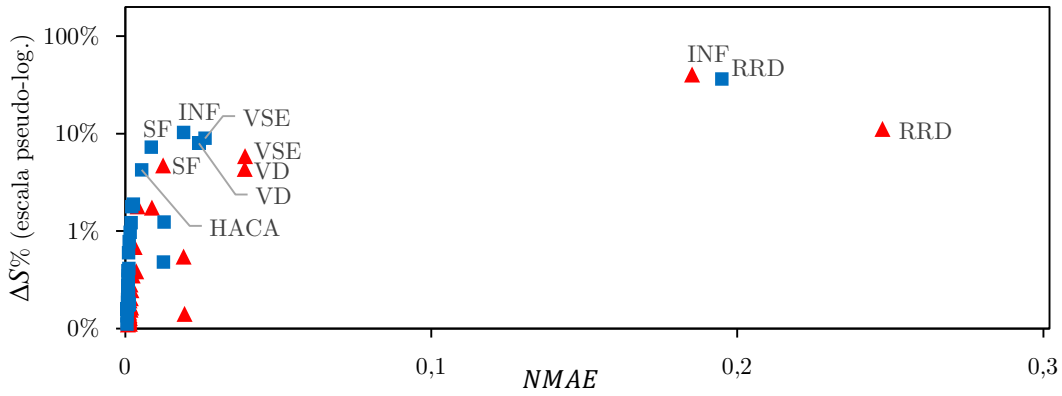


Figura E.3 Resultados del SA sobre HR (triángulos rojos) y T° (cuadrados azules) en ‘ENTRE_PISO’

Resultados para la Zona “LAB_MEC”.

A continuación, se presenta el gráfico de sensibilidad para la zona “LAB_MEC” (Laboratorio subterráneo de Tecnología Mecánica).

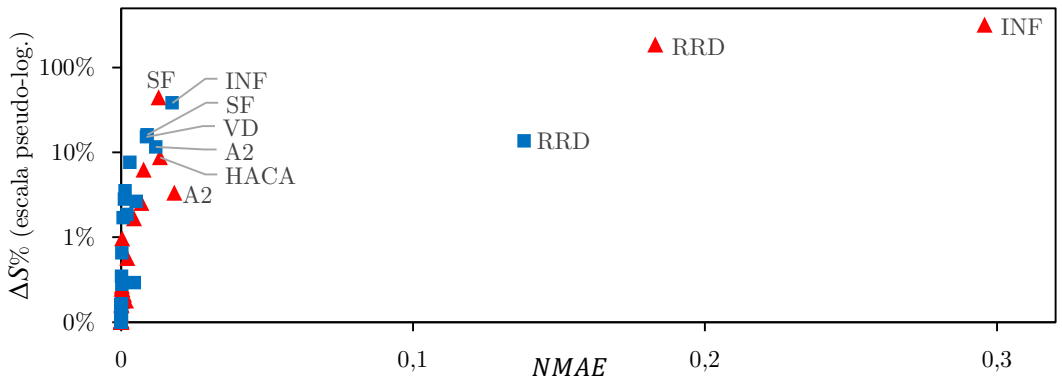


Figura E.4 Resultados del SA sobre HR (triángulos rojos) y T° (cuadrados azules) en ‘LAB_MEC’