

**UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA**  
SEDE CONCEPCION REY BALDUINO DE BELGICA  
CONCEPCION

**APLICACIÓN DEL MODELO TÉRMICO 1R-1C, EN 2 RECINTOS DE  
LA UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARIA SEDE  
CONCEPCIÓN.**

**CESAR NOVA PIZARRO**

**2025**

**UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA**

**SEDE CONCEPCION**

**“REY BALDUINO DE BELGICA”**

**APLICACION DEL MODELO TERMICO 1R-1C, EN 2 RECINTOS DE LA  
UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA - SEDE  
CONCEPCION**

**TRABAJO PARA OPTAR AL TITULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO CONSTRUCTOR**

**Alumno: Cesar Israel Nova Pizarro**

**Profesor Guía: Reinaldo Roberto Valedobenito**

**2025**



## 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: Aplicación del modelo térmico 1R-1C, en 2 recintos de la universidad Técnica Federico Santa María sede Concepción.

Nombre del candidato(a): Cesar Israel Nova Pizarro

Carrera / Grado: ingeniería en construcción.

Campus: Sede concepción. Departamento: Departamento de construcción.

### 2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Reinaldo Roberto Valdebenito Oñate, 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.
- 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: 12/01/2026 Firma: \_\_\_\_\_

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 12/01/2026 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.*

|  |    |
|--|----|
| RESUMEN: .....   | 1  |
| INTRODUCCION:.....   | 1  |
| PROBLEMÁTICA.....  | 3  |
| JUSTIFICACION: .....   | 5  |
| OBJETIVO GENERAL:.....   | 7  |
| OBJETIVOS ESPECIFICOS: .....   | 7  |
| MARCO TEORICO: .....   | 8  |
| MARCO NORMATIVO: .....   | 11 |
| METODOLOGIA:.....  | 12 |
| CAPÍTULO 1: Base teórica del modelo térmico 1R-1C, su formulación matemática y su aplicación. ....           | 15 |
| 1.1: CLASIFICACION DE LOS MODELOS TERMICOS .....   | 16 |
| 1.2: FORMULACIÓN GENERAL DEL MODELO TÉRMICO 1R-1C .....  | 17 |
| 1.3: ANALOGÍA TÉRMICO-ELÉCTRICA.....   | 18 |
| 1.4: PRINCIPIO DE CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA .....   | 19 |
| 1.5: FORMULACIÓN GENERAL DEL BALANCE ENERGÉTICO. ....  | 20 |
| 1.5.1: INTERPRETACIÓN DE CADA TÉRMINO .....  | 21 |
| 1.5.2: INTERPRETACIÓN FÍSICA DEL BALANCE .....   | 22 |
| 1.6: LEY DE FOURIER (1822) = Flujo a través de la envolvente $\rightarrow \phi_e = H_{tot} (T_e - T_i)$ .... | 22 |
| 1.6.1: SIMPLIFICACIÓN PARA UNA PARED PLANA.....  | 23 |
| 1.7: DEFINICIÓN DEL COEFICIENTE DE TRANSMISIÓN TÉRMICA GLOBAL .....  | 23 |
| 1.7.1: EXTENSIÓN A UN RECINTO COMPLETO .....   | 24 |
| 1.7.2: INTERPRETACIÓN FÍSICA.....  | 25 |
| 1.8: ALCANCES Y LIMITACIONES DEL MODELO TÉRMICO 1R-1C. ....  | 25 |
| 1.9: REGLAMENTACIÓN TÉRMICA RT 3.0. ZONA TÉRMICA 4 .....   | 26 |
| 1.10: IMPORTANCIA DEL MODELO 1R-1C EN SIMULACIONES TÉRMICAS.....   | 27 |
| 1.11: CONSTANTE DE TIEMPO TÉRMICA Y COMPORTAMIENTO DEL RECINTO .....   | 28 |
| 1.11.1: INTERPRETACIÓN FÍSICA DE LA CONSTANTE DE TIEMPO .....  | 28 |
| 1.11.2: IMPORTANCIA EN SIMULACIONES DINÁMICAS .....  | 29 |

|   |    |
|---|----|
| 1.12: MASA TÉRMICA Y SU INFLUENCIA EN LA ESTABILIDAD TÉRMICA DEL RECINTO .....  | 29 |
| 1.12.1: DEFINICIÓN Y FORMULACIÓN.....   | 30 |
| 1.12.2: COMPORTAMIENTO TÉRMICO ASOCIADO A LA MASA .....   | 30 |
| 1.13: CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA Y NORMATIVA CHILENA .....   | 31 |
| 1.13.1: RELACIÓN DEL MODELO 1R-1C CON LOS PLANES DE<br>DESCONTAMINACIÓN AMBIENTAL (PDA) .....   | 31 |
| 1.13.2: PERTINENCIA DEL MODELO 1R-1C EN ESTE CONTEXTO.....  | 32 |
| CAPÍTULO 2: “Caracterización de los recintos y definición del plan de medición<br>térmica” .....  | 34 |
| 2.1: DESCRIPCIÓN DE LOS RECINTOS A EVALUAR. ....  | 35 |
| 2.1.1: DESCRIPCIÓN DEL PRIMER RECINTO (POLIDEPORTIVO) .....   | 35 |
| 2.1.2: DESCRIPCIÓN DEL SEGUNDO RECINTO (FABLAB) .....   | 38 |
| 2.2: CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE LA ENVOLVENTE Y PARÁMETROS PARA LA<br>SIMULACIÓN. ....  | 40 |
| 2.3: INSTRUMENTACIÓN Y EQUIPOS DE MEDICIÓN. ....  | 41 |
| 2.3.1: HOBO MX CO <sub>2</sub> Logger. ....   | 42 |
| 2.3.2: ESTACION METEOROLOGICA. ....   | 43 |
| 2.4: PLANIFICACIÓN DE LA CAMPAÑA DE MEDICIÓN (2 SEMANAS) .....  | 44 |
| 2.4.1: PROCEDIMIENTOS DE ENSAYOS A REALIZAR .....   | 44 |
| CAPITULO3: Ejecutar un procedimiento para medir la evolución térmica de un recinto<br>bajo condiciones climáticas reales y variables relevantes. utilizando instrumentos<br>adecuados ..... | 46 |
| 3.1: TRANSMITANCIA TÉRMICA DE LA ENVOLVENTE Y DETERMINACIÓN DE <i>H<sub>tot</sub></i> ..  | 47 |
| 3.1.1: CALCULO DE LA TRANSMITANCIA TERMICA DEL MURO DELANTERO DEL<br>(POLIDEPORTIVO).....   | 47 |
| 3.1.2: CÁLCULO DE LA TRANSMITANCIA TÉRMICA DE UN MURO LATERAL (FABLAB)<br>.....   | 49 |
| 3.2: PRIMERA SEMANA: REGISTRO DE TEMPERATURA INTERIOR SIN<br>PERTURBACIONES EXTERNAS. ....  | 51 |
| 3.2.1: REGISTRO Y PROCESAMIENTO DE LA TEMPERATURA EXTERIOR. ....  | 52 |
| 3.2.2: TEMPERATURAS REGISTRADAS FABLAB. (Semana 1 .....   | 52 |
| 3.2.3: REPRESENTACION GRAFICA DE LA PRIMERA SEMANA. ....  | 53 |
| 3.2.4: TEMPERATURAS REGISTRADAS POLIDEPORTIVO. (semana 1).....  | 54 |

|  |    |
|--|----|
| 3.2.5: REPRESENTACION GRAFICA DE LA PRIMERA SEMANA .....   | 55 |
| 3.3: SEGUNDA SEMANA: REGISTRO DE TEMPERATURA INTERIOR CON<br>CALEFACCIÓN.....  | 55 |
| 3.3.1: TEMPERATURAS PROMEDIO HORARIAS REGISTRADAS EN EL RECINTO<br>FABLAB. ....  | 56 |
| 3.3.2: REPRESENTACION GRAFICA DE LA SEGUNDA SEMANA .....   | 57 |
| 3.3.3: TEMPERATURAS PROMEDIO HORARIAS REGISTRADAS EN EL RECINTO<br>POLIDEPORTIVO.....  | 57 |
| 3.3.4: REPRESENTACION GRAFICA DE LA SEGUNDA SEMANA .....   | 59 |
| 3.4: RADIACIÓN SOLAR.....  | 59 |
| CAPÍTULO 4: “Análisis de la simulación térmica mediante el modelo 1R-1C y<br>comparación con datos medidos” .....              | 61 |
| 4.1: ANÁLISIS TRANSMITANCIA TÉRMICA DE LA ENVOLVENTE Y DE <i>Htot</i> .....  | 62 |
| 4.1.1: TRANSMITANCIA TÉRMICA (POLIDEPORTIVO) .....   | 62 |
| 4.1.2: HTOT ANÁLISIS Y RESULTADO (POLIDEPORTIVO).....  | 64 |
| 4.1.3: TRANSMITANCIA TÉRMICA (FABLAB).....   | 65 |
| 4.1.4: HTOT ANÁLISIS Y RESULTADO (FABLAB).....   | 66 |
| 4.2: REGISTRO GRAFICO PRIMERA SEMANA .....   | 67 |
| 4.2.1: EVOLUCIÓN TÉRMICA REGISTRADA DURANTE LA PRIMERA SEMANA DE<br>MEDICIÓN (ESCENARIO SIN PERTURBACIONES) FABLAB. ....       | 67 |
| 4.2.2: EVOLUCIÓN TÉRMICA REGISTRADA DURANTE LA PRIMERA SEMANA DE<br>MEDICIÓN (ESCENARIO SIN PERTURBACIONES) POLIDEPORTIVO..... | 68 |
| 4.3: ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO INTERIOR.....   | 69 |
| 4.3.1: RECINTO FABLAB VS. RECINTO POLIDEPORTIVO (SEMANA 1, SIN<br>PERTURBACIONES). ....  | 69 |
| 4.4: REGISTRO GRAFICO SEGUNDA SEMANA.....  | 70 |
| 4.4.1: EVOLUCIÓN TÉRMICA REGISTRADA DURANTE LA SEGUNDA SEMANA DE<br>MEDICIÓN (ESCENARIO CON CALEFACCIÓN) FABLAB. ....          | 70 |
| 4.4.2: EVOLUCIÓN TÉRMICA REGISTRADA DURANTE LA SEGUNDA SEMANA DE<br>MEDICIÓN (ESCENARIO CON CALEFACCIÓN) POLIDEPORTIVO. ....   | 71 |
| 4.5: ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO INTERIOR.....   | 72 |
| 4.5.1: RECINTO FABLAB VS. RECINTO POLIDEPORTIVO (SEMANA 2, CON<br>CALEFACCION). ....   | 72 |
| 4.6: ANALISIS.....   | 74 |

|  |    |
|--|----|
| 4.6.1: ANÁLISIS DE LA SIMULACIÓN TÉRMICA – PRIMERA SEMANA (RECINTO POLIDEPORTIVO)..... | 74 |
| 4.6.2: ANÁLISIS DE LA SIMULACIÓN TÉRMICA – PRIMERA SEMANA (RECINTO FABLAB) .....       | 76 |
| 4.7: CONCLUSIONES, APORTES DEL ESTUDIO Y PROYECCIONES DE MEJORA.                       |    |
| 4.7.1: CONCLUSIÓN DEL ESTUDIO A PARTIR DE LOS ANÁLISIS .....                           | 78 |

## INDICE DE TABLAS

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| <b>Tabla 1: Equivalencia de términos</b> .....                | 19                            |
| <b>Tabla 2: Simbología de la fórmula</b> .....                | 20                            |
| <b>Tabla 3: Inercia térmica</b> .....                         | 29                            |
| <b>Tabla 4: Zonas térmicas de Chile</b> .....                 | 31                            |
| <b>Tabla 5: Transmitancia térmica U1</b> .....                | 47                            |
| <b>Tabla 6: Transmitancia térmica Total RT, Total</b> .....   | 48                            |
| <b>Tabla 7: U Ponderado</b> .....                             | 48                            |
| <b>Tabla 8: Resumen Polideportivo</b> .....                   | 49                            |
| Tabla 9: U1 Fablab .....                                      | 49                            |
| <b>Tabla 10: U Ponderado Fablab</b> .....                     | ¡Error! Marcador no definido. |
| <b>Tabla 11: U Global Fablab</b> .....                        | 50                            |
| <b>Tabla 12: Resumen Fablab</b> .....                         | 50                            |
| <b>Tabla 13: Temperaturas Fablab semana 1</b> .....           | 52                            |
| <b>Tabla 14: Temperaturas Polideportivo semana 1</b> .....    | 54                            |
| <b>Tabla 15: Promedio de temperaturas Fablab</b> .....        | 56                            |
| <b>Tabla 16: Promedio de temperaturas Polideportivo</b> ..... | 58                            |
| <b>Tabla 17: U1 Polideportivo</b> .....                       | 62                            |
| <b>Tabla 18: Transmitancia térmica Total RT, Total.</b> ..... | 62                            |
| <b>Tabla 19: U ponderado muro delantero</b> .....             | ¡Error! Marcador no definido. |
| <b>Tabla 20: Calculo Htot. + Datos del recinto</b> .....      | 64                            |
| <b>Tabla 21: Transmitancia térmica (FABLAB) U1</b> .....      | 65                            |
| <b>Tabla 22: U ponderado muro lateral</b> .....               | 65                            |
| <b>Tabla 23: Calculo Htot. + Datos del recinto</b> .....      | 66                            |

## INDICE DE GRAFICOS

|  |    |
|--|----|
| <b>Gráfico 1: Semana 1 Promedio temperatura Interior vs. Exterior de los 7 días. (Fablab)</b> .....        | 53 |
| <b>Gráfico 2: Semana 1 Promedio temperatura Interior vs. Exterior de los 7 días. (Polideportivo)</b> ..... | 55 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Gráfico 3: Semana 2 Promedio temperatura Interior vs. Exterior de los 7 días. (Fablab)</b>        | 57 |
| <b>Gráfico 4: Semana 2 Promedio temperatura Interior vs. Exterior de los 7 días. (Polideportivo)</b> | 59 |
| <b>Gráfico 5: Radiación solar por hora</b>   | 60 |
| <b>Gráfico 6: Semana 1 (FabLab)</b>  | 67 |
| <b>Gráfico 7: Semana 1 (Polideportivo)</b>   | 68 |
| <b>Gráfico 8: Semana 2 (FabLab)</b>  | 71 |
| <b>Gráfico 9: Semana 2 (Polideportivo)</b>   | 72 |
| <b>Gráfico 10: Simulaciones térmica (Polideportivo)</b>  | 74 |
| <b>Gráfico 11: Simulación térmica (Fablab)</b>   | 76 |

## INDICE DE IMAGEN E ILUSTRACIONES

|   |    |
|---|----|
| <b>Imagen 1: Vista frontal de primer piso, recinto 1.</b>               | 35 |
| <b>Imagen 2: Vista interior, muro frontal de primer piso, recinto 1</b> | 36 |
| <b>Imagen 3: Vista interior, muro frontal de primer piso, recinto 1</b> | 37 |
| <b>Imagen 4: Vista interior, techumbre de primer piso, recinto 1</b>    | 37 |
| <b>Imagen 5: Vista exterior, muro frontal de primer piso, recinto 2</b> | 38 |
| <b>Imagen 6: Vista exterior, muro frontal de primer piso, recinto 2</b> | 39 |
| <b>Imagen 7: Vista exterior, Piso elevado, recinto 2</b>                | 40 |
| <b>Imagen 8: Instrumento Hobo</b>                                       | 42 |
| <b>Imagen 9: Ubicación estación meteorológica (vista mapa)</b>          | 43 |
| <br>  |    |
| <b>Ilustración 1: Diagrama térmico -eléctrico</b>                       | 9  |
| <b>Ilustración 2: Informe Gráfico radiación solar (SINCA)</b>           | 59 |



## **RESUMEN:**

El trabajo consiste en verificar la aplicabilidad del modelo térmico simplificado 1R–1C en dos recintos reales, mediante una metodología que combina caracterización de envolvente, medición experimental y simulación numérica. La lógica del estudio se organiza de forma progresiva: primero se describe cada recinto y su composición constructiva; luego se determinan parámetros globales de intercambio térmico a partir de la envolvente; posteriormente se desarrolla una campaña de medición planificada; y finalmente se implementa el modelo en un entorno computacional y se comparan curvas simuladas con curvas medidas.

Para resolver el modelo se utilizan dos esquemas numéricos (Euler explícito y Runge–Kutta de cuarto orden), y el contraste con los registros experimentales se centra en evaluar si el modelo reproduce el ciclo térmico diario observado (tendencia de enfriamiento nocturno, calentamiento diurno y comportamiento del peak). El informe sostiene que el modelo captura adecuadamente la tendencia general, mostrando un desempeño más consistente en el recinto con condiciones más estables, mientras que en el recinto más complejo aparecen desviaciones atribuibles a condiciones reales difíciles de representar con un modelo lumped (operación del recinto, infiltraciones y representatividad de las condiciones de borde).

## **INTRODUCCION:**

La aislación térmica en edificaciones constituye un elemento fundamental para garantizar el confort ambiental, la eficiencia energética y la sostenibilidad económica de las viviendas. Una envolvente térmica bien diseñada permite reducir significativamente la demanda de calefacción y refrigeración, disminuyendo los costos operacionales y mejorando la habitabilidad de los espacios. En un escenario global marcado por el incremento sostenido de los precios energéticos y la creciente urgencia

climática, optimizar el desempeño térmico de los edificios se ha convertido en una prioridad técnica, social y normativa.

En Chile, esta necesidad adquiere especial relevancia debido a las pronunciadas variaciones térmicas entre estaciones y a la implementación progresiva de nuevas exigencias normativas. De acuerdo con el Ministerio de Energía (2019), cerca del **73 % del consumo energético residencial** se destina a calefacción, climatización y agua caliente sanitaria, lo que posiciona al uso térmico como la principal carga energética de los hogares. Este dato evidencia la importancia crítica del diseño térmico y del adecuado desempeño de la envolvente para reducir la demanda energética y promover edificaciones más eficientes.

Pese a los avances logrados, persisten brechas significativas en la evaluación térmica de viviendas, especialmente en etapas tempranas del diseño arquitectónico o en contextos de autoconstrucción. La próxima entrada en vigor de la **Reglamentación Térmica RT 3.0**, contenida en el artículo 4.1.10 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC), establecida para noviembre de 2025, exigirá estándares más rigurosos de eficiencia térmica en nuevas obras residenciales, de salud y educación. Lo anterior refuerza la necesidad de herramientas accesibles y confiables que permitan estimar el comportamiento térmico de los recintos antes de su construcción, evitando decisiones empíricas que incrementen el consumo energético o compliquen el cumplimiento normativo.

En este contexto, los modelos térmicos simplificados se presentan como alternativas útiles para apoyar decisiones de diseño. Entre ellos, destaca la metodología propuesta por **Michalak (2020)**, basada en el uso del modelo dinámico de, **1 Resistencia y 1 capacitor (1R-1C)** resuelto mediante el método numérico de Euler Explícito y **Runge Kutta de cuarto orden (RK4)**. Este enfoque, fundamentado en la analogía térmico-eléctrica, donde la resistencia limita el flujo de calor y el condensador almacena energía, ha demostrado un desempeño adecuado en estudios internacionales, permitiendo representar con precisión la evolución térmica de recintos mediante una formulación simple y de bajo costo computacional.

Sin embargo, pese a su difusión internacional, **No abundan estudios nacionales del tema**, lo que impide conocer su precisión, comportamiento y aplicabilidad en el contexto del clima nacional. Esta ausencia de evidencia limita su uso potencial en la evaluación térmica de viviendas, particularmente en climas templado-húmedos como el de Concepción, donde la masa térmica, la humedad relativa y las oscilaciones de temperatura influyen significativamente en la estabilidad térmica interior.

Frente a este escenario, el presente trabajo tiene por objetivo **evaluar y comprobar la aplicabilidad local del modelo 1R-1C**, resolviéndolo mediante los métodos numéricos **Euler explícito y Runge-Kutta de cuarto orden**, ambos implementados en Python. La metodología será contrastada con datos reales obtenidos durante ensayos que realizaremos a dos recintos con características constructivas distintas, con el fin de analizar cómo la masa térmica, la envolvente y la inercia influyen en la precisión del modelo.

## **PROBLEMÁTICA**

En Chile, el diseño y la construcción de edificaciones enfrentan un escenario cada vez más exigente, marcado por la urgencia de avanzar hacia sistemas eficientes, saludables y sostenibles. Durante las etapas tempranas del diseño arquitectónico, **momento clave donde se definen la materialidad, la geometría y la envolvente térmica** se determinan en gran medida el desempeño térmico del edificio, su demanda energética futura y su capacidad de cumplir con los estándares normativos. Sin embargo, este proceso crítico suele desarrollarse sin herramientas de simulación accesibles y confiables que permitan evaluar cuantitativamente el comportamiento térmico antes de construir.

Este desafío se vuelve particularmente relevante en un contexto energético nacional caracterizado por alzas sostenidas en las tarifas de electricidad. Según la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC), se proyecta un aumento promedio del 7,1 % en las tarifas eléctricas a partir de julio de 2025, situación que

incrementa los costos asociados a la calefacción y climatización residencial. En territorios con climas más rigurosos, estos incrementos pueden comprometer el acceso a condiciones térmicas adecuadas, afectando directamente el confort y el gasto energético de los hogares.

A estos desafíos se suma la dependencia histórica de la calefacción a leña, recurso de bajo costo percibido, pero altamente contaminante. De acuerdo con la Estrategia de Transición Energética Residencial (Ministerio de Energía, 2020), la combustión residencial de leña genera cerca del 85 % de las emisiones nacionales de material particulado fino MP2.5, contribuyendo a más de 3.600 muertes prematuras anuales. Esta situación es crítica en ciudades del sur de Chile, donde comunas como Coyhaique, Temuco, Padre Las Casas y Osorno han sido declaradas zonas saturadas y se encuentran bajo Planes de Descontaminación Atmosférica (PDA), los cuales exigen edificaciones más eficientes y restringen el uso de calefactores contaminantes.

En este contexto, la capacidad de predecir el comportamiento térmico de un recinto en fases tempranas se vuelve una necesidad técnica y normativa. No obstante, los profesionales del sector enfrentan barreras significativas: las herramientas de simulación más reconocidas internacionalmente, como TRNSYS o DesignBuilder, presentan altos costos de licencia, tiempos prolongados de procesamiento y requieren elevados niveles de especialización. Esto las vuelve inaccesibles para estudiantes, oficinas pequeñas, profesionales independientes y una parte importante del ecosistema del diseño arquitectónico y constructivo en Chile.

Como resultado, muchas decisiones fundamentales respecto al diseño térmico continúan tomándose de forma empírica, sin respaldo cuantitativo, lo que deriva en edificaciones con deficiencias térmicas, mayor consumo energético, desconexión con las exigencias normativas vigentes y dificultades para enfrentar adecuadamente el contexto energético y ambiental actual.

A lo anterior se suma una brecha científica relevante: **la ausencia de evaluación empírica de modelos térmicos simplificados en condiciones climáticas chilenas.**

Aunque este modelo es ampliamente utilizado internacionalmente debido a su simplicidad y sólida base física, su desempeño no ha sido contrastado con mediciones reales en recintos representativos de la construcción ligera y masiva nacional. Esta falta de evidencia local impide aprovechar su potencial como herramienta accesible, de bajo costo computacional y apta para apoyar decisiones tempranas de diseño.

En consecuencia, persiste un problema estructural en el sector: **la carencia de modelos térmicos comprobados localmente, simples de implementar y accesibles económicamente**, que permitan evaluar de manera confiable el comportamiento térmico de recintos bajo condiciones reales. Esta brecha limita la capacidad de proyectar edificaciones con mejor desempeño energético, dificulta la transición hacia sistemas de calefacción menos contaminantes y obstaculiza la toma de decisiones informadas en el diseño arquitectónico, la planificación territorial y la mejora de la calidad de vida de la población.

## **JUSTIFICACION:**

El estudio del comportamiento térmico de recintos habitacionales ha adquirido creciente relevancia en Chile, especialmente en el contexto de la Reglamentación Térmica RT 3.0 y de las políticas orientadas a mejorar la eficiencia energética y el confort interior de las viviendas. Sin embargo, a pesar de estos avances, la aplicación de metodologías de simulación térmica en el país sigue dependiendo en gran medida de modelos desarrollados y validados en contextos internacionales, cuya precisión bajo condiciones climáticas locales no siempre ha sido comprobada. Esta falta de evidencia dificulta la adopción de herramientas de simulación accesibles, eficientes y confiables, limitando su integración en el diseño y evaluación térmica de edificaciones chilenas.

El modelo 1R-1C constituye una de las representaciones dinámicas más utilizadas a nivel global debido a su fundamento físico claro, su bajo costo computacional y su capacidad para capturar la evolución térmica de un recinto mediante una formulación simplificada. No obstante, pese a su amplia difusión, **se carece de estudios que validen**

**empíricamente este modelo bajo las particularidades climáticas y constructivas de Chile**, ni comparaciones directas con mediciones reales obtenidas en recintos representativos del país. Esta ausencia de investigaciones locales limita su uso potencial en estudios de eficiencia energética, diagnósticos térmicos y procesos formativos en ingeniería y construcción.

La relevancia de esta investigación se intensifica aún más en el contexto energético actual. De acuerdo con la Comisión Nacional de Energía (CNE), las tarifas eléctricas residenciales experimentarán un incremento promedio de 7,1 % a partir de julio de 2025, mientras que el índice de precios de suministro eléctrico aumentó aproximadamente un 60 % entre 2018 y 2025. Esta tendencia alcista, sumada a la necesidad de reducir emisiones de gases de efecto invernadero, ha impulsado la búsqueda de soluciones constructivas más eficientes y basadas en evidencia. A esto se suma la progresiva eliminación del uso de calefactores a leña en zonas urbanas, promovida por los Planes de Descontaminación Atmosférica (PDA), lo cual exige viviendas con un mejor desempeño térmico, capaces de mantener confort interior sin depender de sistemas contaminantes o energéticos que provocan aumentos en el precio de la luz.

Ante este escenario, la presente investigación se justifica en la necesidad de **comprobar experimentalmente el modelo térmico 1R-1C bajo condiciones climáticas reales de la Zona Térmica 4 (Concepción)**. Para ello, el modelo será implementado mediante dos métodos numéricos: Euler explícito y Runge Kutta de cuarto orden (RK4), programados en Python, prescindiendo de software comercial con el fin de asegurar transparencia, accesibilidad y replicabilidad.

La verificación se efectuará contrastando los resultados del modelo con mediciones térmicas reales obtenidas durante un periodo continuo en dos recintos construidos con materialidades diferentes. Este diseño experimental permitirá analizar cómo influyen la masa térmica, la inercia y la envolvente en la precisión del modelo, evaluando si un enfoque simplificado como el 1R-1C es capaz de reproducir adecuadamente el

comportamiento térmico de recintos sometidos a variaciones climáticas propias del sur de Chile.

En este sentido, comprobar esta metodología representa una contribución significativa, fortalecería la toma de decisiones informadas en el diseño energético de viviendas chilenas, favoreciendo construcciones más sostenibles, confortables y eficientes. Asimismo, aportaría evidencia relevante para el ámbito académico y profesional, incorporando herramientas numéricas programables que pueden ser implementadas incluso en contextos con recursos tecnológicos limitados.

Por tanto, la presente investigación no solo aborda una brecha científica evidente, sino que también ofrece un aporte práctico alineado con las necesidades energéticas, económicas y ambientales del país, contribuyendo a mejorar la calidad térmica de las edificaciones y a avanzar hacia un desarrollo habitacional más sustentable.

#### **OBJETIVO GENERAL:**

*Evaluar modelo térmico 1R-1C en 2 recintos de la Universidad técnica Federico Santa María sede Concepción, verificando su desempeño en condiciones locales.*

#### **OBJETIVOS**

#### **ESPECIFICOS:**

1. Describir el modelo de 1 resistencia 1 capacitor (1R-1C), a partir de sus fundamentos teóricos.
2. Establecer un procedimiento para medición térmica en base a las condiciones requeridas por modelo 1R-1C
3. Ejecutar un procedimiento que permita registrar las variables térmicas de ambos recintos bajo condiciones climáticas reales, utilizando instrumentos adecuados para la obtención de datos confiables.

4. Contrastar resultados obtenidos con métodos numéricos Euler y RK4 con los datos obtenidos mediante el protocolo de la medición térmica, con el fin de Verificar la idoneidad de modelo 1R-1C en el contexto local.

## **MARCO TEORICO:**

### **1. Fundamentos de transferencia de calor en edificaciones.**

La transferencia de calor en edificaciones ocurre por conducción, convección y radiación (Incropera et al., 2007). Estos procesos determinan cómo fluye la energía térmica a través de la envolvente del edificio, afectando directamente el confort interior y el consumo energético.

- Conducción: ocurre en muros, techos y pisos; depende del material. Por ejemplo, el hormigón transmite más calor que aislantes como la lana mineral (ISO 10456:2007).
- Convección: se produce entre las superficies del edificio y el aire interior o exterior.
- Radiación: es el intercambio de energía térmica entre superficies, influido por la exposición solar.

Estos intercambios se integran en un balance energético del recinto, representado por la ecuación:

$$\Phi_e + \Phi_g = C \cdot \frac{dT_i}{dt}$$

Donde:

- $\Phi_e$ : flujo de calor desde el exterior.
- $\Phi_g$ : ganancias internas.
- $C$ : capacidad térmica del recinto.

- $T_i$ : temperatura interior.
- Además, la **masa térmica** de los materiales (muros interiores, losas) ayuda a regular la temperatura, reduciendo las oscilaciones térmicas diarias (González & Navarro, 2006).

## EL MODELO “LUMPED CAPACITANCE” (CAPACITANCIA CONCENTRADA) 1R-1C

El modelo 1R-1C es una representación térmica simplificada basada en la analogía con circuitos eléctricos:

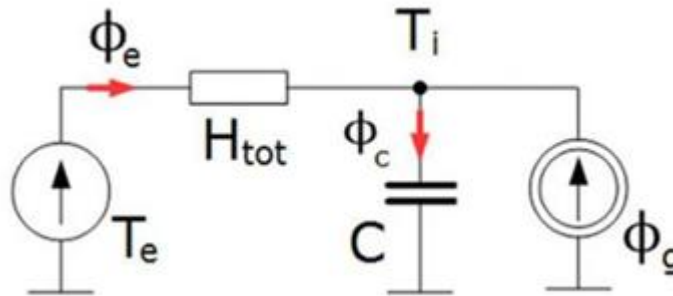


Ilustración 1: Diagrama térmico -eléctrico

Donde:

- $T_e$  corresponde a la temperatura exterior °C.
- $\Phi_e$  corresponde al flujo de calor externo W.
- $H_{tot}$  corresponde a la resistencia térmica total del recinto W/K.
- $T_i$  corresponde a la temperatura interior °C.
- $\Phi_C$  corresponde al flujo de calor hacia la capacidad térmica W.
- $C$  corresponde a la capacidad térmica del recinto J/K.
- $\Phi_g$  corresponde a las ganancias internas de calor W.

La resistencia térmica (R) limita el flujo de calor, y la capacidad térmica (C) representa la inercia térmica del recinto, es decir, su capacidad de almacenar energía (Michalak, 2020).

Este modelo asume que la temperatura interior es uniforme (sin gradientes), y que el intercambio térmico se puede representar con una única entrada/salida de calor. Su simplicidad permite resolver la evolución de la temperatura en el tiempo mediante ecuaciones diferenciales de primer orden:

$$C * \left(\frac{dT_i}{dt}\right) = \frac{(T_e - T_i)}{R}$$

Donde:

- $T_i$  corresponde a la **temperatura interior del recinto** °C.
- $T_e$  corresponde a la **temperatura exterior** °C.
- $R$  corresponde a la **resistencia térmica equivalente de la envolvente** K/W.
- $C$  corresponde a la **capacidad térmica total del recinto** J/K.

Ha sido calificado con buenos resultados en estudios como el de Michalak (2020), quien comparó varios métodos numéricos aplicados al modelo 1R–1C y concluyó que ofrece una excelente relación entre precisión y simplicidad.

#### **Método de Runge-Kutta de cuarto orden (RK4).**

El método de **Runge-Kutta de cuarto orden (RK4)** es una técnica numérica usada para resolver ecuaciones diferenciales ordinarias (EDOs), como las que surgen en modelos térmicos dinámicos tipo 1R–1C.

A diferencia del método de Euler, que es simple pero poco preciso, o del método de Heun, que mejora la estabilidad, pero aún tiene limitaciones, RK4 logra un mejor equilibrio entre precisión y eficiencia computacional (Michalak, 2020). *Thermal–*

*electrical analogy in dynamic simulations of buildings: Comparison of four numerical solution methods. Journal of Mechanical and Energy Engineering, 4(2), 179–188.*

RK4 estima el valor futuro de la variable (como la temperatura interior) combinando cuatro evaluaciones intermedias de la pendiente de la función, lo que permite una aproximación más exacta del comportamiento real:

$$T_{i+1} = T_i + \left(\frac{1}{6}\right)(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

donde los coeficientes  $k_n$  representan derivadas calculadas en distintos puntos del intervalo de tiempo.

Este método ha sido ampliamente usado en **simulaciones térmicas horarias** por su capacidad para modelar con alta fidelidad los cambios de temperatura a lo largo del tiempo, sin requerir pasos de integración extremadamente pequeños.

Según Michalak (2020), el método RK4 **supera a Euler y Heun en precisión**, manteniendo tiempos de cómputo razonables, lo que lo convierte en una excelente opción para resolver el modelo térmico 1R–1C.

## **MARCO NORMATIVO:**

### **Normativas térmicas en Chile**

La Reglamentación Térmica (**RT**) en Chile establece los requisitos mínimos que deben cumplir las edificaciones en términos de aislación y eficiencia energética, en función de su zona climática. Estas normativas están contenidas en el Artículo 4.1.10 de la OGUC, y han evolucionado desde su primera versión en 2000, con nuevas exigencias para muros, techumbres y ventanas incorporadas en 2007 (*MINVU, 2024*).

En mayo de 2024 se publicó la actualización RT 3.0, que entrará en vigor en noviembre de 2025. Esta nueva versión amplía de 7 a 9 las zonas térmicas del país y exige mejores

estándares de transmitancia térmica, control de infiltraciones, y prevención de condensación (*Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2024*). Además, por primera vez, la normativa será obligatoria no solo para viviendas, sino también para edificaciones de salud y educación.

Estas nuevas exigencias normativas refuerzan la necesidad de contar con herramientas de simulación térmica accesibles y confiables, que permitan prever el desempeño de los recintos desde las etapas tempranas de diseño. Evaluar el cumplimiento normativo con modelos simples como el 1R-1C representa una alternativa útil para profesionales que no disponen de software especializado.

### **Programa de descontaminación ambiental:**

En Chile, las zonas urbanas con alta contaminación del aire están reguladas mediante los Planes de Descontaminación Ambiental (PDA), implementados por el Ministerio del Medio Ambiente bajo la Ley N°19.300. Estos planes se aplican en zonas saturadas donde se exceden los niveles permitidos de contaminantes, especialmente material particulado fino (MP2.5).

Ciudades como Temuco, Coyhaique, Osorno y Padre Las Casas han sido declaradas zonas saturadas debido al uso intensivo de leña para calefacción residencial, principal fuente de emisiones de MP2.5. Los PDA restringen el uso de calefactores contaminantes y exigen mayores estándares de eficiencia térmica en nuevas edificaciones, promoviendo aislación reforzada en techumbres, muros y ventanas.

Esta regulación hace que el diseño térmico eficiente no solo sea deseable, sino obligatorio en ciertas zonas del país, reforzando la necesidad de herramientas de simulación térmica accesibles y precisas desde las etapas tempranas del proyecto.

### **METODOLOGIA:**

- **Estudiar fuentes de información.**

comprender los fundamentos del modelo térmico 1R-1C, y su uso en simulaciones térmicas en arquitectura. Se revisarán artículos científicos, estudios internacionales (como Michalak, 2020) y fuentes nacionales relevantes (Ministerio de Energía, MINVU, SINIA) que contextualizan el uso de simulaciones térmicas en el diseño de viviendas.

- **Escoger un diseño y elegir un lugar para hacer las pruebas.**

Para llevar a cabo la evaluación del modelo térmico, se seleccionará un recinto físico ubicado en la ciudad de Concepción, correspondiente a la zona térmica 4 según la Reglamentación Térmica Chilena (RT 3.0). Este lugar será utilizado como espacio controlado para ejecutar las mediciones térmicas necesarias.

El diseño experimental contempla un recinto de geometría simple, construido con materiales conocidos y expuesto a condiciones ambientales reales.

- **Variables que vamos a controlar.**

Durante el experimento se identificaron variables clave que pueden influir en la temperatura interior del recinto. Estas se clasificaron como:

- **Independientes**, como la temperatura exterior y la radiación solar, que serán registradas para incorporarlas al modelo.
- **Dependientes**, como la temperatura interior, que será la variable principal para analizar y comparar.
- **Controladas**, como los materiales del recinto, la ventilación, la ausencia de fuentes internas de calor y la posición fija de los sensores, que se mantendrán constantes durante todo el experimento.

El adecuado control y monitoreo de estas variables permitirá obtener datos confiables para contrastar con los resultados del modelo teórico.

- **Generar un protocolo para todas las mediciones.**

Para garantizar la confiabilidad de los datos recolectados y permitir una adecuada comparación entre los resultados teóricos y los experimentales, se elaboró un protocolo técnico de medición que detalla los procedimientos, condiciones y herramientas empleadas durante el experimento. Este protocolo asegura la replicabilidad del estudio y el control de las variables críticas involucradas en el comportamiento térmico del recinto.

- **Simulación en software.**

evaluar la precisión del modelo 1R–1C frente a datos reales obtenidos, se desarrollará una simulación computacional utilizando el método numérico de Runge-Kutta de cuarto orden (RK4) y el método de Euler Explícito. Esta simulación permitirá modelar la evolución térmica del recinto en función del intercambio de calor con el ambiente, replicando las condiciones registradas en terreno. El resultado de esta simulación es una curva de temperatura simulada para el mismo periodo en que se realizaron las mediciones. Esta curva será posteriormente comparada con los datos reales, para evaluar la capacidad del modelo de predecir con precisión el comportamiento térmico en el contexto climático chileno.

**CAPÍTULO 1: Base teórica del modelo térmico 1R-1C, su formulación matemática y su aplicación.**

## 1.1: CLASIFICACION DE LOS MODELOS TERMICOS

Los modelos utilizados para estudiar el comportamiento térmico de un recinto pueden agruparse en tres categorías según su consideración del tiempo.

**Los métodos estacionarios:** Asumen que las condiciones térmicas permanecen constantes, como si se tratara de una fotografía fija donde no existen variaciones climáticas ni cambios de temperatura.

**Los métodos cuasi estacionarios:** Permiten incorporar cambios suaves y poco frecuentes, semejantes a una secuencia de imágenes tomadas en intervalos regulares, donde cada momento se analiza como si estuviera casi en equilibrio.

**Los métodos dinámicos:** Entre los cuales se encuentra el modelo 1R–1C—representan de manera realista los estados transitorios, siguiendo cómo evoluciona la temperatura interior a lo largo del tiempo, del mismo modo que una película donde se observa cada cambio provocado por el clima exterior, la ventilación, la radiación solar y las propiedades térmicas del recinto. Esta capacidad de describir la evolución temporal es lo que hace que los modelos dinámicos sean fundamentales para comprender el comportamiento térmico real de una vivienda.

De acuerdo con Michalak (2020), los modelos dinámicos se aplican cada vez con mayor frecuencia gracias al avance de la tecnología computacional, permitiendo análisis horarios o sub-horarios que reflejan con mayor precisión los efectos del clima, la ventilación y las ganancias internas en la temperatura interior. En ese contexto, el modelo térmico de 1 Resistencia y 1 Capacitor (1R–1C) constituye una formulación simplificada pero representativa del comportamiento térmico de una edificación, siendo ampliamente utilizado en investigaciones y normativas internacionales como VDI 6007 o ISO 52016-1.

## 1.2: FORMULACIÓN GENERAL DEL MODELO TÉRMICO 1R-1C

El modelo térmico de una resistencia y un condensador (1R-1C) constituye una representación simplificada pero físicamente coherente del comportamiento térmico de un recinto habitacional. Su finalidad es describir cómo evoluciona la temperatura interior en el tiempo, considerando tres procesos fundamentales:

- el calor almacenado en la masa térmica del recinto,
- el flujo de calor que ingresa o sale a través de la envolvente debido a la diferencia de temperatura entre el exterior y el interior,
- las ganancias internas generadas por la radiación solar, los ocupantes y los equipos.

El modelo resume estos procesos en una sola ecuación diferencial, permitiendo representar de forma dinámica la respuesta térmica del recinto ante variaciones climáticas o condiciones de uso. A diferencia de métodos estacionarios, que suponen condiciones constantes, el modelo 1R-1C es dinámico, pues incorpora explícitamente el paso del tiempo y la capacidad de los materiales para almacenar energía, aspecto clave para reproducir la inercia térmica característica de las edificaciones.

La formulación del modelo combina dos principios físicos. Primero, la Ley de Fourier, que describe el flujo de calor por conducción entre el exterior y el interior del recinto; y segundo, el principio de conservación de la energía, que establece que la variación de energía almacenada dentro del recinto debe igualar el calor que ingresa menos el que se pierde. Al integrar ambos principios se obtiene la expresión general del modelo:

$$C \frac{dT_i}{dt} = H_{tot}(T_e - T_i) + \varphi_g$$

Esta ecuación **actúa como un mapa general del modelo**, que luego será explicado pieza por pieza. Además, captura de manera compacta la interacción entre la envolvente térmica, la masa térmica y las cargas internas, permitiendo simular cómo la temperatura interior responde a variaciones externas y a la presencia de fuentes de

calor. Gracias a su simplicidad y fundamento físico, el modelo 1R–1C constituye un punto de partida idóneo para estudiar el comportamiento térmico dinámico de recintos habitacionales bajo diferentes condiciones climáticas, y sirve como base para su resolución numérica mediante diferentes métodos numéricos.

### 1.3: ANALOGÍA TÉRMICO–ELÉCTRICA

El modelo 1R–1C se basa en la **analogía TÉRMICO-ELECTRICA**, una herramienta ampliamente utilizada para simplificar la representación y comprensión de la transferencia de calor. Esta analogía permite modelar el comportamiento térmico de un recinto mediante un **circuito eléctrico equivalente**, donde cada componente físico del sistema térmico posee un equivalente eléctrico que facilita su análisis.

En esta correspondencia conceptual, la **temperatura** se interpreta de forma análoga al **voltaje**, ya que ambos representan una “diferencia de potencial” que impulsa un flujo. El **flujo de calor** ( $\varphi$ ), por su parte, se asemeja a la **corriente eléctrica**, puesto que ambos describen la cantidad de energía que se transfiere por unidad de tiempo. La **resistencia térmica** se asocia a una **resistencia eléctrica**, ya que ambas se oponen al flujo (de calor o de corriente), y su magnitud depende de las propiedades del material que atraviesan. Finalmente, la **capacidad térmica** del recinto se representa mediante un **condensador (C)**, el cual almacena energía y la libera gradualmente, del mismo modo que los materiales de un recinto absorben y liberan calor según varía su temperatura interior.

Esta equivalencia puede resumirse de la siguiente manera:

| Componente eléctrico | Componente térmico        | Significado físico                            |
|----------------------|---------------------------|---|
| Voltaje (V)          | Temperatura (T)           | Diferencia de potencial térmico               |
| Corriente (I)        | Flujo de calor ( $\phi$ ) | Energía que entra o sale por unidad de tiempo |
| Resistencia (R)      | Resistencia térmica       | Oposición al paso del calor                   |
| Capacitor (C)        | Capacidad térmica         | Energía que puede almacenar el recinto        |

**Tabla 1: Equivalencia de términos**  
**Fuente: Elaboración propia**

Gracias a esta analogía, el recinto puede representarse como un **circuito RC** donde la diferencia de temperatura entre el exterior ( $T_e$ ) y el interior ( $T_i$ ) actúa como una fuente de voltaje, la resistencia térmica global de la envolvente corresponde al elemento R, y la masa térmica del recinto funciona como el condensador C. Esta representación simplificada permite visualizar con claridad cómo el calor fluye hacia el interior cuando la temperatura exterior es mayor, cómo se disipa cuando el ambiente es más frío, y cómo el recinto acumula parte de esa energía debido a su inercia térmica. El uso de esta analogía facilita la comprensión del modelo 1R–1C y permite aplicar herramientas matemáticas similares a las utilizadas en circuitos eléctricos para analizar la evolución temporal de la temperatura interior.

#### **1.4: PRINCIPIO DE CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA**

El modelo térmico 1R–1C se fundamenta en el principio de conservación de la energía, el cual establece que la variación de energía almacenada en un sistema cerrado es igual a la energía que ingresa menos la que egresa del mismo. De acuerdo con Moran y Shapiro (2018), este principio es la base de cualquier análisis termodinámico aplicado a sistemas físicos, incluyendo recintos habitacionales. Según Incropera et al. (2007),

este principio permite formular un balance térmico que relaciona la energía acumulada, el calor transferido y las ganancias internas dentro de un espacio cerrado.

1. La energía almacenada en la masa térmica del recinto (muros, piso, techo, aire interior).
2. El intercambio de calor con el ambiente exterior, a través de la envolvente y la ventilación.
3. Las ganancias internas debidas a radiación solar, ocupantes y equipos.

### 1.5: FORMULACIÓN GENERAL DEL BALANCE ENERGÉTICO.

El balance puede expresarse en forma diferencial como:

$$\text{Energía acumulada} = \text{Energía entrante} - \text{Energía saliente.}$$

y en términos de potencia térmica (W):

$$C \frac{dT_i}{dt} = H_{tot}(T_e - T_i) + \varphi_g$$

| <b>Símbolo</b> | <b>Descripción</b>                                      | <b>Unidad</b> |
|----------------|---|---------------|
| <b>(C)</b>     | Capacidad térmica total del recinto                     | [J/K]         |
| <b>(Ti)</b>    | Temperatura interior                                    | [°C o K]      |
| <b>(Te)</b>    | Temperatura exterior                                    | [°C o K]      |
| <b>Htot</b>    | Transmitancia térmica total (transmisión + ventilación) | [W/K]         |
| <b>ϕg</b>      | Ganancias internas (personas, radiación solar, equipos) | [W]           |

**Tabla 2: Simbología de la fórmula**

### 1.5.1: INTERPRETACIÓN DE CADA TÉRMINO

**El balance energético que describe este comportamiento se compone de tres procesos fundamentales:**

a)  $C \frac{dT_i}{dt}$ : Energía acumulada o liberada

Representa la tasa de variación de la energía interna del recinto, es decir, el calor que la masa térmica absorbe o libera al cambiar su temperatura. En términos simples, indica cómo se calienta o enfría el recinto en función del tiempo. Este término es positivo cuando la temperatura interior aumenta (acumulación de calor) y negativo cuando disminuye (liberación).

$$\left[ C \frac{dT_i}{dt} \right] = [\text{J/K}] \cdot [\text{K/s}] = [\text{J/s}] = [\text{W}]$$

b)  $H_{tot}(T_e - T_i)$ : Flujo de calor entre exterior e interior

Corresponde al flujo de calor neto que atraviesa la envolvente, tanto por conducción como por ventilación, debido a la diferencia de temperatura entre el ambiente exterior ( $T_e$ ) y el interior ( $T_i$ ).

Cuando  $T_e > T_i$ , el término es positivo (el calor entra); cuando  $T_e < T_i$ , el término es negativo (el calor sale).

c)  $\varphi_g$ : Ganancias internas

Incluye todas las fuentes internas de calor dentro del recinto: radiación solar incidente, ocupantes, iluminación y equipos eléctricos. Su efecto es aumentar la temperatura interior, contribuyendo de forma directa al balance energético.

### 1.5.2: INTERPRETACIÓN FÍSICA DEL BALANCE

El modelo expresa, en esencia, que el cambio en la temperatura interior ( $T_i$ ) se debe al equilibrio entre el calor que entra o sale del recinto y el calor que éste es capaz de almacenar.

- Si las ganancias ( $H_{tot}(T_e - T_i) + \varphi_g$ ) son mayores que el calor acumulado, la temperatura interior aumenta.
- Si son menores, la temperatura interior disminuye.
- En equilibrio térmico, cuando no hay variación de temperatura, se cumple que:

$$C \frac{dT_i}{dt} = 0 \Rightarrow H_{tot}(T_e - T_i) + \varphi_g = 0$$

lo que significa que el calor que entra es igual al que sale.

### 1.6: LEY DE FOURIER (1822) = Flujo a través de la envolvente $\rightarrow \varphi_e = H_{tot} (T_e - T_i)$

La transferencia de calor por conducción a través de un muro o cualquier elemento constructivo puede describirse mediante la Ley de Fourier, la cual establece que el flujo de calor es proporcional al gradiente de temperatura en el interior del material. Su forma diferencial se expresa como:

$$\dot{q} = -k \frac{dT}{dx}$$

donde:

- $\dot{q}$ : flujo de calor por unidad de área [ $\text{W}/\text{m}^2$ ],
- $k$ : conductividad térmica del material [ $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ],
- $\frac{dT}{dx}$ : gradiente de temperatura en la dirección del flujo [ $\text{K}/\text{m}$ ].

El signo negativo indica que el calor fluye desde la zona de mayor temperatura hacia la de menor temperatura.

### 1.6.1: SIMPLIFICACIÓN PARA UNA PARED PLANA

Si se considera un muro plano y homogéneo de espesor  $L$ , con temperatura exterior  $T_e$  e interior  $T_i$ , el gradiente  $\frac{dT}{dx}$  puede asumirse lineal y constante. En ese caso, la ecuación de Fourier se integra como:

$$\dot{q} = \frac{k}{L}(T_e - T_i)$$

Al multiplicar por el área del muro  $A$ , se obtiene el flujo total de calor a través de dicho elemento:

$$\varphi = A \cdot \frac{k}{L}(T_e - T_i)$$

### 1.7: DEFINICIÓN DEL COEFICIENTE DE TRANSMISIÓN TÉRMICA GLOBAL

El término  $\frac{k}{L}$  corresponde al coeficiente de transmisión térmica unitaria, que representa la facilidad con que el calor atraviesa un material. En edificación, se denomina

coeficiente de transferencia térmica ( $U$ ), y su producto con el área del elemento define la conductancia térmica:

$$U = \frac{k}{L} \quad \backslash \quad H = U * A$$

Así, la ecuación anterior puede expresarse de forma más compacta:

$$\varphi = H(T_e - T_i)$$

Este flujo representa la energía térmica por unidad de tiempo (W) que atraviesa la superficie del muro cuando existe una diferencia de temperatura ( $T_e - T_i$ ).

### 1.7.1: EXTENSIÓN A UN RECINTO COMPLETO

En un recinto real, el calor no se transmite únicamente por un muro, sino por todas las superficies que conforman la envolvente (muros, ventanas, techo, piso), además de las pérdidas por ventilación e infiltraciones de aire. Por tanto, la conductancia térmica total del recinto se obtiene sumando las contribuciones de cada componente:

$$H_{tot} = \sum(U_i \cdot A_i) + H_{ve}$$

donde:

- $U_i$ : coeficiente de transmisión térmica del elemento  $i$  [ $W/m^2 \cdot K$ ],
- $A_i$ : área del elemento  $i$  [ $m^2$ ],
- $H_{ve}$ : conductancia equivalente por ventilación o infiltración de aire [ $W/K$ ].

De esta forma,  $H_{tot}$  integra en un solo parámetro la transmisión de calor por conducción y las pérdidas por ventilación, representando la facilidad global con la que el recinto intercambia calor con el exterior.

### 1.7.2: INTERPRETACIÓN FÍSICA

- Si  $H_{tot}$  es grande, el recinto pierde o gana calor fácilmente, lo que indica bajo aislamiento térmico.
- Si  $H_{tot}$  es pequeño, el recinto está mejor aislado, y el intercambio térmico con el entorno es más lento.
- En el modelo 1R–1C, este flujo se expresa como  $H_{tot}(T_e - T_i)$ , el cual actúa como una “corriente térmica” entre el nodo exterior y el interior, de forma análoga a una corriente eléctrica que circula a través de una resistencia cuando hay diferencia de voltaje.

### 1.8: ALCANCES Y LIMITACIONES DEL MODELO TÉRMICO 1R–1C.

El modelo térmico 1R–1C es uno de los enfoques más utilizados en la simulación de edificios, principalmente por su simplicidad, bajo costo computacional y sólida base física. Representa al recinto mediante un único nodo térmico que agrupa la masa interior y una resistencia equivalente que sintetiza la interacción con el exterior. Esta estructura permite describir adecuadamente la temperatura interior media, la demanda energética y la evolución térmica general del recinto en simulaciones horarias, como señalan Michalak (2020) y Clarke (2001).

No obstante, el 1R–1C presenta limitaciones cuando se busca analizar fenómenos muy específicos relacionados con la alta masa térmica, como el flujo interno de calor en muros muy gruesos, la amortiguación térmica detallada o las temperaturas de superficie interior. En estos casos puntuales, pueden emplearse modelos más complejos como el 2R–2C, los cuales incorporan nodos separados para el aire y la masa térmica,

permitiendo una representación más detallada de dinámicas internas poco relevantes en recintos convencionales (Hensen & Lamberts, 2011; VDI 6007, 2012).

Aun así, estos modelos de mayor orden no son necesarios en la mayoría de los estudios energéticos de carácter residencial o académico, ya que agregan complejidad sin aportar mejoras significativas cuando se analiza la temperatura interior media o el desempeño térmico global. Para el tipo de recinto considerado en esta tesis y los objetivos planteados, evaluar un método numérico simple y eficiente como RK4 bajo condiciones realistas, el modelo 1R–1C se presenta como la opción más adecuada, ampliamente aceptada en la l

### **1.9: REGLAMENTACIÓN TÉRMICA RT 3.0. ZONA TÉRMICA 4**

La Reglamentación Térmica RT 3.0 clasifica a Concepción dentro de la **Zona Térmica 4**, correspondiente a un clima templado-húmedo. Esta zona presenta variaciones térmicas diarias moderadas, por lo que la calidad de la envolvente térmica es fundamental para controlar el flujo de calor entre el interior y el exterior.

Para esta zona, la RT 3.0 establece **valores máximos de transmitancia térmica (U)** para la envolvente:

- **Muros:** 1.7 W/m<sup>2</sup>K
- **Techumbre:** 0.8 W/m<sup>2</sup>K
- **Pisos ventilados:** 1.0 W/m<sup>2</sup>K
- **Ventanas vidrio simple:** 3.3 W/m<sup>2</sup>K
- **Ventanas termo panel:** 2.4 W/m<sup>2</sup>K

Estos valores normativos se utilizan directamente para calcular el parámetro  $H_{tot}$  del modelo térmico 1R–1C, que representa el flujo total de calor que atraviesa la

envolvente del recinto. Un menor valor de  $U$  implica menos pérdidas térmicas, una envolvente más eficiente y una mayor estabilidad interior.

La RT 3.0 también promueve una mejor hermeticidad, reduciendo infiltraciones de aire, lo que mejora la precisión del modelo al calcular el componente de ventilación  $H_{ve}$ .

En el contexto de Concepción, el cumplimiento de la normativa aporta beneficios adicionales relacionados con el **Plan de Descontaminación Atmosférica**, ya que una mejor aislación reduce la demanda de calefacción residencial y, en consecuencia, el uso de combustibles contaminantes como la leña.

En resumen, la RT 3.0 entrega los parámetros mínimos de desempeño térmico requeridos en Zona 4 y sirve como base para determinar los valores normativos de  $U_i$  y  $H_{tot}$  utilizados en este estudio, asegurando que el análisis térmico se realice bajo condiciones realistas y correctamente contextualizadas.

### **1.10: IMPORTANCIA DEL MODELO 1R-1C EN SIMULACIONES TÉRMICAS**

El modelo 1R-1C constituye el punto de partida para modelos más complejos (2R-2C, nR-nC) y se utiliza extensamente en investigaciones y normas internacionales (VDI 6007, PN-EN ISO 52016-1).

Su principal ventaja es que simplifica el comportamiento térmico real del edificio en una ecuación fácil de implementar computacionalmente, manteniendo una precisión adecuada para análisis energéticos, estudios de confort.

Según Michalak (2020), este tipo de modelo se aplica ampliamente debido a su bajo costo computacional y su capacidad para representar el comportamiento dinámico real de un recinto bajo condiciones climáticas variables.

## 1.11: CONSTANTE DE TIEMPO TÉRMICA Y COMPORTAMIENTO DEL RECINTO

La constante de tiempo térmica, representada por la letra griega  $\tau$ , es uno de los parámetros más importantes del modelo 1R-1C, ya que caracteriza la respuesta dinámica del recinto frente a variaciones de temperatura exterior o de las condiciones internas.

Este parámetro define la rapidez con que el sistema alcanza un nuevo equilibrio térmico luego de una perturbación (por ejemplo, un cambio en la temperatura ambiente, un aporte solar o una variación en la ventilación).

Matemáticamente, la constante de tiempo térmica se obtiene de la relación entre la capacidad térmica total y la conductancia global del recinto:

$$\tau = \frac{C}{H_{tot}}$$

donde:

- $C$ : capacidad térmica total del recinto [J/K].
- $H_{tot}$ : transmitancia térmica total [W/K].

El cociente tiene unidades de segundos [s], lo que indica el tiempo característico del sistema para alcanzar un porcentaje significativo del nuevo equilibrio térmico.

### 1.11.1: INTERPRETACIÓN FÍSICA DE LA CONSTANTE DE TIEMPO

La constante de tiempo  $\tau$  representa cuánto tarda el recinto en adaptarse a un cambio térmico.

Cuando el exterior experimenta una variación brusca de temperatura, el recinto no responde instantáneamente debido a su inercia térmica (masa y capacidad calorífica de

los materiales).

El comportamiento puede interpretarse de la siguiente manera:

| Valor de $\tau$           | Tipo de recinto   | Comportamiento térmico                                     |
|---------------------------|---|--|
| Bajo ( $\tau < 2$ , h)    | Liviano (madera, tabique delgado)                       | Cambios rápidos de temperatura, poca estabilidad interior. |
| Medio ( $\tau = 3-6$ , h) | Mixto (muros medianos, recintos con aislación moderada) | Comportamiento intermedio, variación controlada.           |
| Alto ( $\tau > 8$ , h)    | Pesado (hormigón, ladrillo, albañilería)                | Alta estabilidad térmica, variaciones interiores lentas.   |

Tabla 3: Inercia térmica  
Fuente: Elaboración propia

### 1.11.2: IMPORTANCIA EN SIMULACIONES DINÁMICAS

En simulaciones térmicas, la constante de tiempo es esencial para determinar el paso de tiempo adecuado ( $\Delta t$ ) y evaluar la estabilidad numérica de los métodos de resolución. Un paso de tiempo demasiado grande puede omitir variaciones significativas, mientras que uno demasiado pequeño aumenta el costo computacional. Por ello, conocer el valor aproximado de  $\tau$  permite optimizar la simulación y ajustar la escala temporal del cálculo.

### 1.12: MASA TÉRMICA Y SU INFLUENCIA EN LA ESTABILIDAD TÉRMICA DEL RECINTO

La masa térmica corresponde a la cantidad de material con capacidad para almacenar y liberar calor dentro de un recinto. En el modelo 1R-1C, este fenómeno se representa mediante la capacidad térmica total  $C$ , que se carga o descarga en función de las condiciones térmicas.

Cuando el recinto recibe un flujo de calor positivo el condensador almacena energía. Cuando el flujo es negativo, libera energía al ambiente interior.

EL valor  $C$  agrupa el efecto combinado de los elementos constructivos (muros, losas, techos, pisos y aire interior). La masa térmica desempeña un rol determinante en el comportamiento dinámico de la temperatura interior, especialmente frente a variaciones rápidas de las condiciones exteriores.

### 1.12.1: DEFINICIÓN Y FORMULACIÓN

La capacidad térmica total del recinto se expresa como:

$$C = \sum(m_i \cdot c_i)$$

donde:

- $m_i$ : masa del elemento  $i$  [kg],
- $c_i$ : calor específico del material [J/kg·K].

Esta relación cuantifica la cantidad de energía requerida para aumentar la temperatura del recinto en 1 kelvin (o grado Celsius). A mayor  $C$ , mayor será la energía necesaria para calentar o enfriar el recinto, lo que se traduce en una respuesta térmica más lenta y estable.

### 1.12.2: COMPORTAMIENTO TÉRMICO ASOCIADO A LA MASA

La masa térmica actúa como un amortiguador térmico, moderando las oscilaciones de temperatura.

Cuando la temperatura exterior aumenta durante el día, parte de ese calor se almacena en los elementos masivos del recinto, reduciendo el incremento de temperatura interior.

Durante la noche, cuando el exterior se enfría, esa energía acumulada se libera gradualmente, evitando descensos bruscos en la temperatura interior.

### 1.13: CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA Y NORMATIVA CHILENA

El Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU), a través de la Reglamentación Térmica RT 3.0, establece exigencias de transmitancia térmica y control de infiltraciones para las edificaciones en Chile. El territorio se divide en siete zonas térmicas, según la severidad climática y las temperaturas promedio anuales. En este estudio, se considera la Zona Térmica 4, correspondiente a la ciudad de Concepción, que presenta un clima templado húmedo, con temperaturas moderadas y alta variabilidad diaria.

| <b>Zona<br/>térmica</b> | <b>Ciudad<br/>representativa</b> | <b>Características</b> |
|-------------------------|----------------------------------|------------------------|
| 1                       | Arica                            | Muy cálida y árida     |
| 2                       | Copiapó                          | Cálida y seca          |
| 3                       | Valparaíso                       | Templado costero       |
| <b>4</b>                | <b>Concepción</b>                | <b>Templado húmedo</b> |
| 5                       | Temuco                           | Frío lluvioso          |
| 6                       | Coyhaique                        | Muy frío               |
| 7                       | Punta Arenas                     | Polar                  |

**Tabla 4: Zonas térmicas de Chile**  
Fuente: OGUC RT3.0

#### 1.13.1: RELACIÓN DEL MODELO 1R-1C CON LOS PLANES DE DESCONTAMINACIÓN AMBIENTAL (PDA)

En Chile, el sector residencial tiene un papel relevante en las emisiones contaminantes atmosféricas, especialmente en zonas del centro y sur del país. De acuerdo con el Ministerio del Medio Ambiente (MMA), la combustión de leña para calefacción domiciliaria constituye una de las principales fuentes de material particulado fino (MP2,5), responsable de altos niveles de contaminación durante el invierno.

Por esta razón, se han establecido Planes de Descontaminación Ambiental (PDA) en diversas comunas del país, entre ellas Temuco, Chillán, Los Ángeles, Osorno, Etc. con el objetivo de reducir las emisiones y mejorar la eficiencia térmica de las viviendas.

Estos planes promueven acciones como:

- La reconversión a sistemas de calefacción más eficientes y menos contaminantes,
- La mejora de la aislación térmica de las viviendas existentes,
- Y la implementación de normativas constructivas que reduzcan la pérdida de calor y, con ello, el consumo de leña.

### **1.13.2: PERTINENCIA DEL MODELO 1R–1C EN ESTE CONTEXTO.**

El modelo térmico 1R–1C puede constituir una herramienta de apoyo técnico para la planificación y evaluación de las medidas de eficiencia energética promovidas en los PDA, ya que permite:

1. Simular el comportamiento térmico dinámico de viviendas con distintos niveles de aislación, masa térmica o ventilación.
2. Cuantificar el efecto del mejoramiento térmico (reducción de  $H_{tot}$ ) sobre el confort interior y la demanda energética de calefacción.

3. Estimar la reducción del consumo de leña o energía, y por ende, el impacto potencial en la disminución de emisiones contaminantes.

**CAPÍTULO 2: “Caracterización de los recintos y definición del plan de medición térmica”**

## **2.1: DESCRIPCIÓN DE LOS RECINTOS A EVALUAR.**

Se seleccionaron 2 recintos para la obtención de datos reales y previa comparación con el modelo térmico.

### **2.1.1: DESCRIPCIÓN DEL PRIMER RECINTO (POLIDEPORTIVO)**

El primer recinto seleccionado para la campaña de mediciones corresponde a una sala independiente ubicada dentro de la **Universidad Técnica Federico Santa María, Sede Concepción**. El espacio posee una superficie aproximada de **25,5 m<sup>2</sup>** y una altura interior total de **2,39 m**, características que permiten realizar mediciones térmicas en condiciones controladas y representativas del comportamiento de construcciones de baja inercia térmica presentes en la zona centro-sur de Chile.



**Imagen 1: Vista frontal de primer piso, recinto 1.**

**Fuente: Elaboración propia**

La **envolvente vertical** está conformada por un sistema mixto. La franja inferior del muro, de aproximadamente **0,70 m de altura** en total, está construida en **albañilería** con un marco de hormigón, aportando una masa térmica moderada capaz de almacenar cierta cantidad de calor. Sobre esta sección se desarrolla un **tabique liviano sin aislación térmica**, con una altura aproximada de **1,88 m**, completando la altura total interior. Esta combinación genera un comportamiento térmico heterogéneo:

- La **albañilería** actúa como un moderador térmico, almacenando y liberando energía lentamente.
- El tabique liviano, en cambio, presenta una respuesta rápida frente a variaciones de temperatura exterior, característica típica de recintos con baja masa térmica.



**Imagen 2: Vista interior, muro frontal de primer piso, recinto 1**  
Fuente: Elaboración propia

El **techo** está conformado por una estructura de **madera a la vista** y un cielo interior delgado, **sin aislación térmica**, lo que incrementa las pérdidas y ganancias de calor hacia el ambiente exterior. El recinto incorpora además 2 **ventanas corredera de**

**vidrio simple**, que funcionan como un punto relevante de transmisión térmica dado su alto coeficiente de pérdidas energéticas.



**Imagen 3: Vista interior, muro frontal de primer piso, recinto 1**  
Fuente: Elaboración propia

Los revestimientos interiores y el **pavimento cerámico** refuerzan el carácter liviano del recinto en términos térmicos, ya que su capacidad de almacenamiento calorífico es reducida.



**Imagen 4: Vista interior, techumbre de primer piso, recinto 1**  
Fuente: Elaboración propia

### 2.1.2: DESCRIPCIÓN DEL SEGUNDO RECINTO (FABLAB)

El segundo recinto seleccionado corresponde a una **sala interior ubicada dentro de un container habilitado como laboratorio**, perteneciente a las dependencias de la **Universidad Técnica Federico Santa María, Sede Concepción**.



**Imagen 5: Vista exterior, muro frontal de primer piso, recinto 2**  
**Fuente: Elaboración propia**

Este espacio fue elegido porque presenta **mejores condiciones de hermeticidad** en comparación con la sala principal del laboratorio, la cual posee un sistema de aire acondicionado y mayor nivel de infiltración. Estas características podrían interferir con la estabilidad de las mediciones térmicas, por lo que se optó por trabajar en la sala interior.

El recinto está delimitado por **cuatro paredes**, de las cuales **tres corresponden a paneles metálicos** propios de la estructura del container, mientras que la cuarta corresponde a un **ventanal interior** que separa este espacio del resto del laboratorio. Esta configuración permite que la sala esté más protegida de perturbaciones directas y del uso frecuente del aire acondicionado cercano, favoreciendo condiciones más estables durante el registro de datos.

**Cubierta y elementos exteriores** Sobre la zona frontal del container se observa un **sombreadero de listones de madera**, el cual genera sombra sobre parte de la estructura exterior, incluyendo el sector donde se ubica la sala estudiada. La presencia de este elemento puede reducir parcialmente la radiación solar directa sobre la superficie metálica del container, afectando el comportamiento térmico de la envolvente exterior.

### **Envolvente exterior e interior**



**Imagen 6: Vista exterior, muro frontal de primer piso, recinto 2**  
**Fuente: Elaboración propia**

Los muros exteriores del recinto corresponden a la estructura metálica del container. Hacia el interior, el recinto cuenta con tabiquería liviana de Metalcon, aislada con poliestireno expandido de 50 mm y revestida con terciado estructural de 11 mm, solución que entrega una aislación térmica básica frente a la envolvente metálica.

El recinto incorpora un ventanal interior que permite la comunicación visual con la sala principal del laboratorio, manteniendo el espacio evaluado más contenido y con menor exposición a perturbaciones térmicas inmediatas.

El piso no presenta aislación térmica, estando compuesto por un entramado de madera cubierto con madera estructural, y se encuentra elevado respecto del terreno, permitiendo la circulación de aire por debajo. La cubierta presenta la misma

configuración que los muros, con aislación de poliestireno expandido de 50 mm y revestimiento interior de terciado de 11 mm.

### **Piso elevado**

Adicionalmente, el container se encuentra **apoyado sobre una base elevada**, por lo que su piso no tiene contacto directo con el terreno. Esta condición permite la circulación de aire por debajo de la estructura, lo que puede influir en el intercambio térmico a través del piso y en las variaciones de temperatura interior.



**Imagen 7: Vista exterior, Piso elevado, recinto 2**  
**Fuente: Elaboración propia**

## **2.2: CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE LA ENVOLVENTE Y PARÁMETROS PARA LA SIMULACIÓN.**

Con el fin de contar con los parámetros térmicos necesarios para la simulación mediante el modelo 1R–1C, en este capítulo se define el procedimiento que se aplicará para caracterizar térmicamente la envolvente de ambos recintos. En particular, se contempla la obtención de la transmitancia térmica (U) de los elementos que componen

el cerramiento, considerando muros, cubierta, piso y vanos, según la materialidad y configuración constructiva descrita previamente.

El procedimiento considera primero determinar el valor  $U$  de cada elemento y, posteriormente, integrar dichos valores mediante un criterio de ponderación asociado a las superficies correspondientes. A partir de esta información se obtendrán los valores globales del recinto, incluyendo el  $U$  global y el parámetro  $H_{tot}$ , el cual resume el intercambio térmico total por transmisión a través de la envolvente.

La estimación de  $H_{tot}$  es especialmente relevante para este estudio, ya que constituye un dato de entrada fundamental del modelo 1R-1C y permite representar el efecto conjunto de toda la envolvente sobre la evolución de la temperatura interior. Por esta razón, la obtención de  $H_{tot}$  depende directamente de contar con valores consistentes de transmitancia térmica y con las áreas asociadas a cada componente del recinto.

Una vez definidos estos parámetros,  $H_{tot}$  se incorporará en la simulación desarrollada en Python junto con otras variables ambientales necesarias, tales como la temperatura exterior, la radiación solar y otras condiciones climáticas registradas durante el período de medición. El desarrollo y presentación detallada de los cálculos, incluyendo las tablas de  $U$  por elemento, el proceso de ponderación y la obtención final del  $U$  global y  $H_{tot}$ , se mostrarán en el Capítulo 3.

### **2.3: INSTRUMENTACIÓN Y EQUIPOS DE MEDICIÓN.**

Para la obtención de datos térmicos se utilizarán instrumentos de medición adecuados para el registro de variables ambientales interiores. La instrumentación seleccionada nos entregará los datos básicos para hacer la simulación.

Los equipos utilizados serán:

- HOBO MX CO<sub>2</sub> Logger,
- Estación meteorológica para registro de condiciones exteriores.

### 2.3.1: HOBO MX CO<sub>2</sub> Logger.

Se utilizará como equipo principal para el registro continuo de las condiciones ambientales interiores durante toda la campaña de medición.



**Imagen 8: Instrumento Hobo**

Las variables registradas serán:

temperatura del aire interior [°C],

humedad relativa [%],

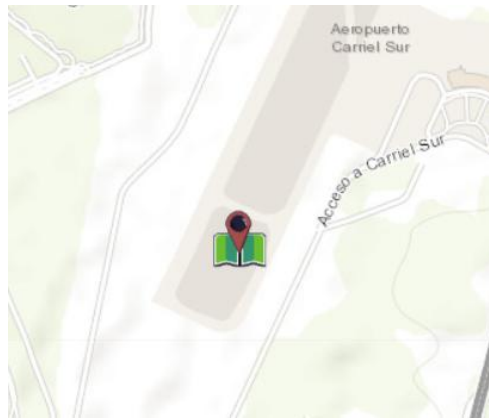
concentración de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) [ppm].

La medición de CO<sub>2</sub> se utiliza como un indicador indirecto de ventilación y ocupación, permitiendo identificar períodos en los que se produce renovación de aire o presencia de personas dentro del recinto, factores que influyen en la evolución de la temperatura interior.

El equipo fue instalado a una altura aproximada de 1,20 a 1,50 m sobre el nivel del piso, en una ubicación representativa del recinto, evitando la influencia directa de fuentes de calor, radiación solar o corrientes de aire localizadas. Este criterio es coherente con recomendaciones de medición ambiental interior establecidas en normas como ISO 7726 y ASHRAE 55.

### 2.3.2: ESTACION METEOROLOGICA.

Para el registro de las condiciones climáticas exteriores se utilizarán datos horarios provenientes de la estación meteorológica ubicada en el Aeropuerto de Concepción, los cuales se consultarán mediante una plataforma web asociada a dicha estación. Esta fuente permitirá disponer de información climática consistente con el período real de medición, evitando el uso de valores estimados o genéricos.



**Imagen 9: Ubicación estación meteorológica (vista mapa)**

Las variables climáticas que se obtendrán desde esta fuente y que se considerarán como datos de entrada para el modelo térmico corresponderán, principalmente, a:

- **Temperatura del aire exterior [ $^{\circ}\text{C}$ ]**, utilizada como condición de borde para representar el intercambio térmico entre interior y exterior.
- **Radiación solar [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]**(o variable equivalente disponible en la plataforma), considerada para representar la influencia de la energía solar incidente sobre la envolvente.
- **Velocidad del viento [ $\text{m}/\text{s}$ ]**, variable relevante por su influencia en las condiciones convectivas exteriores y en el intercambio térmico en superficie.

La obtención de estas variables será fundamental para ejecutar la simulación bajo condiciones climáticas reales, permitiendo que la comparación entre las curvas

medidas y simuladas se realice con coherencia temporal. Los datos descargados desde la plataforma se procesarán en el mismo intervalo horario que los registros interiores, con el fin de asegurar compatibilidad directa entre ambas series de datos.

Durante la Semana de ensayo N°1, estos registros se utilizarán como referencia exterior para el análisis del comportamiento térmico de los recintos bajo condiciones base, mientras que en la Semana N°2 se emplearán como condición exterior para el análisis del comportamiento térmico bajo la incorporación de cargas internas (calefacción), de acuerdo con la planificación definida en este capítulo.

## **2.4: PLANIFICACIÓN DE LA CAMPAÑA DE MEDICIÓN (2 SEMANAS)**

La campaña de medición se planificó con una duración total de 2 semanas consecutivas, con el objetivo de analizar el comportamiento térmico de los recintos bajo distintas condiciones de operación.

La división en períodos semanales permite obtener registros continuos y comparables, reduciendo la influencia de variaciones puntuales y facilitando la interpretación de los datos obtenidos.

Cada semana fue definida de la siguiente manera:

- Semana 1: medición sin perturbaciones externas dentro del recinto.
- Semana 2: medición bajo cargas caloríficas internas controladas.

### **2.4.1: PROCEDIMIENTOS DE ENSAYOS A REALIZAR**

#### **2.4.1.1: ENSAYO 1 SIN PERTURBACIONES EXTERNAS.**

**Objetivo: obtener la respuesta térmica base del recinto.**

**Condiciones del ensayo:**

- Sin personas en el interior.
- Ventanas y puertas cerradas.
- Calefacción apagada.
- Sin cargas internas (equipos eléctricos).

Normativamente, corresponde a un procedimiento recomendado en VDI 6007-1 para identificar la constante de tiempo térmica.

**2.4.1.2: ENSAYO 2 — ENSAYO CON IMPULSO TÉRMICO (CALEFACCIÓN)**

**Objetivo:** la respuesta del recinto frente a una ganancia interna de calor controlada.

**Condiciones del ensayo:**

- Se activará un calefactor eléctrico durante un período DE TIEMPO CONTINUO
- Se registrará su potencia eléctrica instantánea (si es posible) o al menos su potencia nominal.
- Puertas y ventanas cerradas.
- Sin presencia de personas.

**Justificación técnica:**

Este ensayo permite evaluar:

- La capacidad del recinto para almacenar calor.
- ISO 52016-1 (modelos dinámicos de carga térmica).
- VDI 6007-1 (respuesta del recinto frente a cargas internas controladas).

**CAPITULO3: Ejecutar un procedimiento para medir la evolución térmica de un recinto bajo condiciones climáticas reales y variables relevantes. utilizando instrumentos adecuados**

El procedimiento experimental se llevó a cabo durante un período total de dos semanas consecutivas, durante las cuales se realizaron ensayos diferenciados en ambos recintos. Cada semana fue destinada a un escenario específico de operación térmica, permitiendo registrar el comportamiento de los recintos bajo distintas condiciones.

Durante todo el período de medición, la variable principal registrada fue la temperatura interior del recinto, mientras que la temperatura exterior se obtuvo a partir de registros meteorológicos oficiales. Los datos recopilados fueron posteriormente procesados mediante promedios horarios, con el fin de identificar la tendencia térmica diaria característica de cada recinto.

### **3.1: TRANSMITANCIA TÉRMICA DE LA ENVOLVENTE Y DETERMINACIÓN DE $H_{tot}$**

Calculamos la resistencia térmica de cada elemento de la envolvente. A continuación, se presentarán las tablas con los datos y valores de los materiales correspondientes a los muros representativos de cada recinto, las cuales se incluyen a modo representativo para evidenciar el procedimiento aplicado. En este caso, se determinarán primero las transmitancias asociadas a las distintas configuraciones que componen el elemento (U1, U2, U3, entre otras), para posteriormente obtener la resistencia térmica total (RT) y, a partir de ella, el valor de transmitancia térmica ponderada del muro.

#### **3.1.1: CALCULO DE LA TRANSMITANCIA TERMICA DEL MURO DELANTERO DEL (POLIDEPORTIVO)**

| <b>U1</b>             |                |                      |              |
|-----------------------|----------------|----------------------|--------------|
| <b>Elemento</b>       | <b>Espesor</b> | <b>Conductividad</b> | <b>Valor</b> |
| Rsi                   |                |                      | 0,05         |
| Fibrocemento exterior | 0,008          | 0,4                  | 0,02         |
| pino 2x3"             | 0,076          | 0,12                 | 0,63         |
| Osb.                  | 0,011          | 0,14                 | 0,08         |
| Rse                   |                |                      | 0,12         |

**Tabla 5: Transmitancia térmica U1**

Con la suma de resistencias obtenemos el valor de RT para cada U, obtenido ese valor determinamos  $U = 1/RT$

| Total RT |      |      |      |      |
|----------|------|------|------|------|
| RT 1     | RT 2 | RT 3 | RT 4 | RT 5 |
| 0,90     | 0,52 | 0,31 | 0,30 | 0,47 |

| Total U |      |      |      |      |
|---------|------|------|------|------|
| U1      | U2   | U3   | U4   | U5   |
| 1,11    | 1,93 | 3,20 | 3,29 | 2,11 |

**Tabla 6: Transmitancia térmica Total RT, Total**

Calculamos el valor por área de cada U, para obtener así el U ponderado de nuestro elemento.

|           | Valor | %    |
|-----------|-------|------|
| <b>U1</b> | 1,11  | 0,11 |
| <b>U2</b> | 1,93  | 0,60 |
| <b>U3</b> | 3,20  | 0,10 |
| <b>U4</b> | 3,29  | 0,03 |
| <b>U5</b> | 2,11  | 0,16 |

|                    |             |                |
|--------------------|-------------|----------------|
| <b>U ponderado</b> | <b>2,03</b> | <b>(w/m2k)</b> |
|--------------------|-------------|----------------|

**Tabla 7: U ponderado muro delantero (polideportivo)**

A continuación, se presenta la tabla resumen con las dimensiones del recinto, el área total de la envolvente y los valores globales obtenidos de transmitancia térmica (U global) y conductancia térmica total (Htot).

| Dimensiones. |      |   |
|--------------|------|---|
| Largo        | 5,84 | m |
| Ancho        | 4,35 | m |
| Alto         | 2,58 | m |

| Areas (m2)      |              |
|-----------------|--------------|
| Muro lateral *2 | 35,6         |
| Muro trasero    | 11,3         |
| Muro delantero  | 11,3         |
| Techo           | 27,7         |
| Piso            | 25,4         |
| <b>Total</b>    | <b>111,3</b> |

| Htot            |            |
|-----------------|------------|
| Muro lateral *2 | 59,2       |
| Muro trasero    | 13,9       |
| Muro delantero  | 16,1       |
| Techo           | 16,5       |
| Piso            | 72,9       |
| <b>H Total</b>  |            |
| <b>178,6</b>    | <b>W/K</b> |

| U global    |              |
|-------------|--------------|
| <b>1,60</b> | <b>W/m2K</b> |

Tabla 8: U del recinto + H total (polideportivo)

### 3.1.2: CÁLCULO DE LA TRANSMITANCIA TÉRMICA DE UN MURO LATERAL (FABLAB)

| Cálculo de transmitancia termica Muro                                 |         |               |       |
|---|---------|---------------|-------|
| U1(Acero corrugado-Acereo galvanizado-Poliestireno-Acero galvanizado- |         |               |       |
| Elemento  | Espesor | Conductividad | Valor |
| Rsi   |         |               | 0,12  |
| Acero estructural   | 0,002   | 50            | 0,00  |
| Acero galvanizado   | 0,002   | 50            | 0,00  |
| Poliestireno  | 0,05    | 0,038         | 1,32  |
| Acero galvanizado   | 0,002   | 50            | 0,00  |
| Melamina  | 0,015   | 0,2           | 0,08  |
| Rse   |         |               | 0,05  |
|   |         | Rt            | 1,56  |

Tabla 9: U1 Fablab

Luego, se realizó la ponderación de los valores de transmitancia térmica del elemento, considerando la superficie asociada a cada componente.

| Valor              |      | %           |                |
|--------------------|------|-------------|----------------|
| U1                 | 0,64 | 15%         |                |
| U2                 | 0,64 | 85%         |                |
| <b>U ponderado</b> |      | <b>0,64</b> | <b>(w/m2K)</b> |

Tabla 10: U ponderado Fablab

A continuación, se presenta la tabla resumen correspondiente al cálculo de las áreas del recinto y a la determinación de los parámetros térmicos globales, incluyendo la transmitancia térmica global y la conductancia térmica total  $H_{tot}$ , obtenidos a partir de la ponderación de los distintos elementos de la envolvente.

| Dimensiones. |      |   |
|--------------|------|---|
| Largo        | 5,5  | m |
| Ancho        | 2,2  | m |
| Alto         | 2,52 | m |

| Areas (m2)      |             |
|-----------------|-------------|
| Muro lateral *2 | 27,7        |
| Muro trasero    | 5,5         |
| Techo           | 12,1        |
| Piso            | 12,1        |
| Ventanal int.   | 5,5         |
| <b>Total</b>    | <b>63,0</b> |

| Htot            |                 |
|-----------------|-----------------|
| Muro lateral *2 | 17,8            |
| Muro trasero    | 25,2            |
| Techo           | 7,9             |
| Piso            | 7,2             |
| Ventanal int.   | no se considera |
| <b>H Total</b>  |                 |
| <b>58,1</b>     | <b>W/K</b>      |

| U global    |              |
|-------------|--------------|
| <b>0,92</b> | <b>W/m2K</b> |

Tabla 11: U del recinto + H total (Fablab)

No se incluyó el cálculo térmico del ventanal del recinto FABLAB porque este corresponde a un elemento interior, que no forma parte de la envolvente que intercambia calor directamente con el ambiente exterior

Cabe señalar que el mismo criterio de cálculo se aplicará al resto de los componentes del recinto. Sin embargo, para evitar extender innecesariamente el documento, se muestra en detalle solo este elemento como ejemplo. Finalmente, los valores obtenidos para todos los elementos de la envolvente se integrarán para determinar el  $U$  global del recinto y el parámetro  $H_{tot}$ , los cuales serán utilizados como datos de entrada para la simulación térmica.

### **3.2: PRIMERA SEMANA: REGISTRO DE TEMPERATURA INTERIOR SIN PERTURBACIONES EXTERNAS.**

Durante la primera semana de medición se ejecutó el ensayo correspondiente a condiciones base, sin la presencia de perturbaciones externas que pudieran alterar el comportamiento térmico natural de los recintos. En este período no se incorporaron fuentes de calefacción ni se consideraron cargas internas adicionales.

El registro de la temperatura interior se realizó utilizando el sensor HOBO MX, el cual permitió medir la temperatura de forma continua con una frecuencia horaria, registrando valores durante las 24 horas del día. El primer registro se inició el 5 de diciembre de 2025 a las 11:00 horas, manteniéndose el monitoreo de manera ininterrumpida durante toda la semana de ensayo.

A partir de los datos obtenidos, se determinó el promedio horario de la temperatura interior, calculando un valor representativo para cada hora del día (00:00, 01:00, 02:00, ..., 23:00).

### **3.2.1: REGISTRO Y PROCESAMIENTO DE LA TEMPERATURA EXTERIOR.**

De manera paralela al registro de la temperatura interior, se obtuvieron datos de **temperatura exterior** a partir de la estación meteorológica ubicada en el **Aeropuerto de Concepción**. Los registros meteorológicos fueron procesados siguiendo el mismo criterio aplicado a la temperatura interior, calculando promedios horarios para cada instante del día.

Este tratamiento homogéneo de los datos permitió generar una base comparable entre la temperatura interior y exterior, facilitando la representación conjunta de ambas variables en forma de curvas de evolución temporal.

Con los valores promedios horarios obtenidos para la temperatura interior y exterior, se elaboraron gráficos de curvas de evolución térmica para ambos casos. Estas representaciones gráficas permiten visualizar el comportamiento térmico diario de los recintos bajo condiciones sin perturbaciones, y constituyen un insumo fundamental para el análisis posterior desarrollado en el Capítulo 4.

A continuación, se presentarán gráficos representativos de cada recinto y una tabla que muestra promedios de temperaturas horarias de los 7 días con los datos del gráfico. (semana 1).

### **3.2.2: TEMPERATURAS REGISTRADAS FABLAB. (Semana 1)**

| Hora  | Prom. Temp Ext (°C) | Prom. Temp Int (°C) |
|-------|---------------------|---------------------|
| 11:00 | 19,2                | 23,2                |
| 12:00 | 19,0                | 25,3                |
| 13:00 | 18,8                | 26,6                |
| 14:00 | 18,8                | 27,0                |
| 15:00 | 19,1                | 27,2                |
| 16:00 | 18,9                | 27,2                |
| 17:00 | 18,4                | 26,9                |
| 18:00 | 17,8                | 26,1                |
| 19:00 | 17,0                | 25,1                |
| 20:00 | 15,3                | 24,1                |
| 21:00 | 14,6                | 22,9                |
| 22:00 | 14,1                | 21,6                |
| 23:00 | 13,7                | 20,5                |
| 0:00  | 13,6                | 19,6                |
| 1:00  | 13,3                | 18,8                |
| 2:00  | 13,1                | 18,1                |
| 3:00  | 13,0                | 17,6                |
| 4:00  | 12,8                | 17,1                |
| 5:00  | 12,5                | 16,7                |
| 6:00  | 12,6                | 16,4                |
| 7:00  | 14,3                | 16,1                |
| 8:00  | 16,1                | 16,6                |
| 9:00  | 17,8                | 18,3                |
| 10:00 | 18,8                | 20,5                |

Esta tabla de datos contiene el valor de las temperaturas promedio por hora de la primera semana, correspondiente al FABLAB.

### 3.2.3: REPRESENTACION GRAFICA DE LA PRIMERA SEMANA.

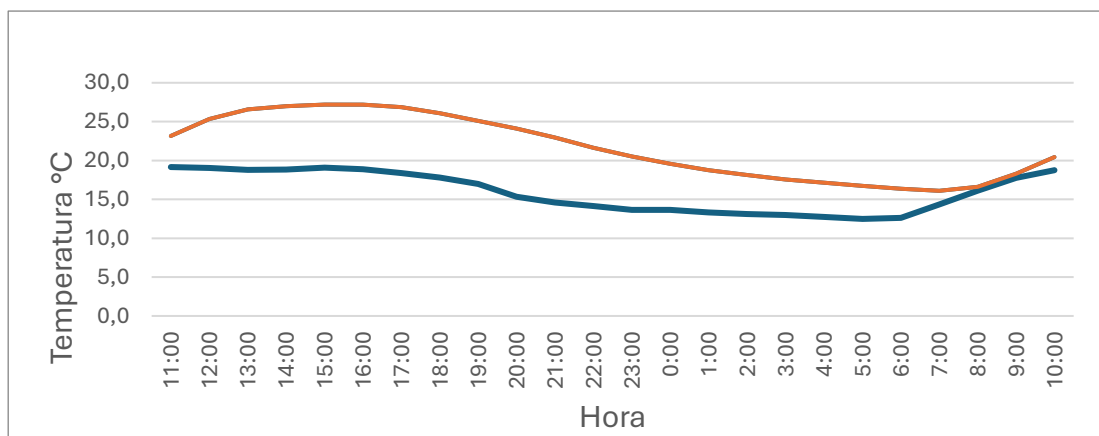


Gráfico 1: Semana 1 Promedio temperatura Interior vs. Exterior de los 7 días. (Fablab)

### 3.2.4: TEMPERATURAS REGISTRADAS POLIDEPORTIVO. (semana 1)

La siguiente tabla presenta los valores de temperatura promedio por hora obtenidos durante la segunda semana de medición en el recinto POLIDEPORTIVO, calculados a partir de los registros horarios de temperatura interior y exterior.

| Hora  | Prom. Temp Ext (°C) | Prom. Temp Int (°C) |
|-------|---------------------|---------------------|
| 12:00 | 18,4                | 19,8                |
| 13:00 | 18,6                | 20,1                |
| 14:00 | 18,7                | 20,6                |
| 15:00 | 18,7                | 21,0                |
| 16:00 | 18,5                | 21,4                |
| 17:00 | 18,0                | 21,6                |
| 18:00 | 17,4                | 21,7                |
| 19:00 | 16,7                | 21,6                |
| 20:00 | 15,4                | 21,3                |
| 21:00 | 14,4                | 20,9                |
| 22:00 | 13,7                | 20,4                |
| 23:00 | 13,1                | 19,9                |
| 0:00  | 12,6                | 19,5                |
| 1:00  | 12,0                | 19,1                |
| 2:00  | 11,5                | 18,7                |
| 3:00  | 11,2                | 18,4                |
| 4:00  | 10,9                | 18,1                |
| 5:00  | 10,6                | 17,8                |
| 6:00  | 10,6                | 17,4                |
| 7:00  | 12,4                | 17,2                |
| 8:00  | 14,1                | 17,0                |
| 9:00  | 15,9                | 17,4                |
| 10:00 | 17,2                | 18,0                |
| 11:00 | 18,1                | 18,8                |

Tabla 13: Temperaturas Polideportivo semana 1

Esta tabla de datos contiene el valor de las temperaturas promedio por hora de la primera semana, correspondiente al POLIDEPORTIVO.

### 3.2.5: REPRESENTACION GRAFICA DE LA PRIMERA SEMANA

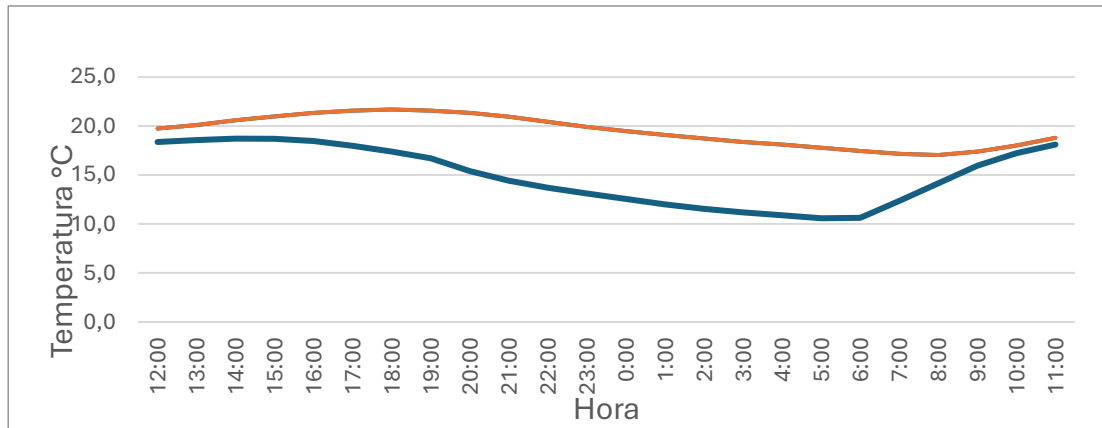


Gráfico 2: Semana 1 Promedio temperatura Interior vs. Exterior de los 7 días. (Polideportivo)

### 3.3: SEGUNDA SEMANA: REGISTRO DE TEMPERATURA INTERIOR CON CALEFACCIÓN.

Durante la segunda semana de medición se implementó un escenario con aporte de calefacción, incorporando un calefactor en ambos recintos con el objetivo de analizar la respuesta térmica frente a una ganancia interna controlada.

El procedimiento de registro fue equivalente al aplicado en la primera semana. La temperatura interior se midió nuevamente mediante el sensor HOBO MX, con registros horarios continuos durante las 24 horas del día. Los datos obtenidos fueron procesados mediante el cálculo de promedios horarios para cada instante del día, siguiendo el mismo criterio metodológico utilizado en la primera etapa del estudio. De igual forma, se emplearon los registros de temperatura exterior provenientes de la estación meteorológica del Aeropuerto de Concepción, los cuales fueron procesados mediante promedios horarios con el fin de mantener coherencia en el tratamiento de los datos.

No obstante, durante el desarrollo de los ensayos correspondientes a la segunda semana, se identificaron **intervenciones no controladas** tanto en el equipo de calefacción como en el entorno de los recintos, las cuales alteraron las condiciones

originalmente planificadas para el ensayo. Estas manipulaciones introdujeron perturbaciones externas que afectan la confiabilidad y repetibilidad de los resultados obtenidos. En consecuencia, los registros asociados a la segunda semana **no serán considerados válidos para el análisis y desarrollo del presente trabajo de investigación**, utilizándose únicamente con carácter referencial y descartándose de los procesos de evaluación y comparación del modelo térmico.

### 3.3.1: TEMPERATURAS PROMEDIO HORARIAS REGISTRADAS EN EL RECINTO FABLAB.

La siguiente tabla presenta los valores de temperatura promedio por hora obtenidos durante la segunda semana de medición en el recinto FABLAB, calculados a partir de los registros horarios de temperatura interior y exterior.

| Hora  | Prom. Temp Ext (°C) | Prom. Temp Int (°C) |
|-------|---------------------|---------------------|
| 12:00 | 18,6                | 24,6                |
| 13:00 | 18,8                | 25,6                |
| 14:00 | 19,2                | 26,2                |
| 15:00 | 19,4                | 26,4                |
| 16:00 | 19,2                | 26,3                |
| 17:00 | 18,7                | 26,0                |
| 18:00 | 18,0                | 25,5                |
| 19:00 | 17,3                | 24,8                |
| 20:00 | 15,9                | 24,0                |
| 21:00 | 14,9                | 23,0                |
| 22:00 | 14,4                | 21,9                |
| 23:00 | 13,9                | 20,8                |
| 0:00  | 13,5                | 19,8                |
| 1:00  | 13,0                | 18,9                |
| 2:00  | 12,6                | 18,3                |
| 3:00  | 12,2                | 17,6                |
| 4:00  | 12,0                | 17,0                |
| 5:00  | 11,7                | 16,5                |
| 6:00  | 11,7                | 16,1                |
| 7:00  | 13,3                | 15,7                |
| 8:00  | 14,8                | 16,4                |
| 9:00  | 16,1                | 18,5                |
| 10:00 | 17,2                | 20,9                |
| 11:00 | 18,1                | 23,1                |

**Tabla 14: Promedio de temperaturas Fablab**

A continuación, se presenta el gráfico de promedios horarios de temperatura interior y exterior correspondiente a la segunda semana de medición en el recinto FABLAB.

### 3.3.2: REPRESENTACION GRAFICA DE LA SEGUNDA SEMANA

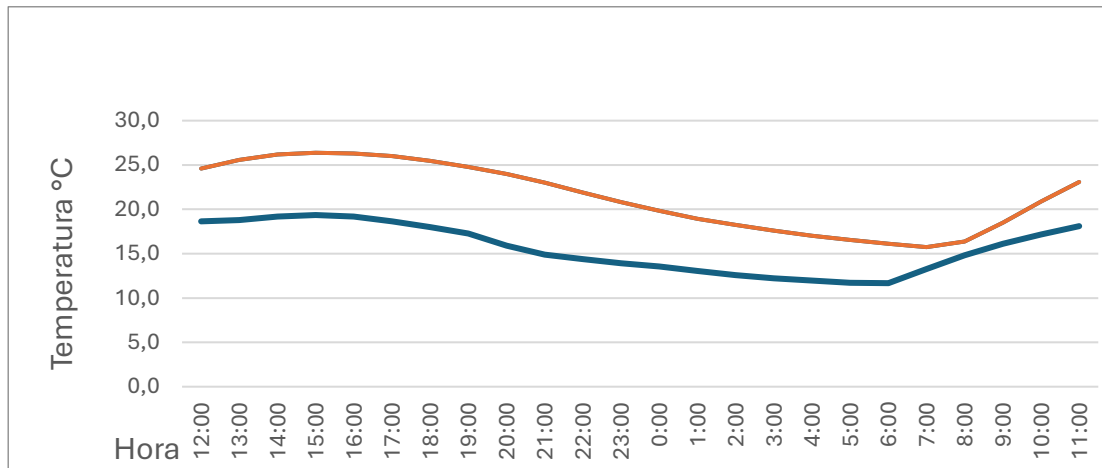


Gráfico 3: Semana 2 Promedio temperatura Interior vs. Exterior de los 7 días. (Fablab)

### 3.3.3: TEMPERATURAS PROMEDIO HORARIAS REGISTRADAS EN EL RECINTO POLIDEPORTIVO.

La siguiente tabla presenta los valores de temperatura promedio por hora obtenidos durante la segunda semana de medición en el recinto POLIDEPORTIVO, calculados a partir de los registros horarios de temperatura interior y exterior.

| <b>Hora</b> | <b>Prom. Temp Ext (°C)</b> | <b>Prom. Temp Int (°C)</b> |
|-------------|----------------------------|----------------------------|
| 13:00       | 19,9                       | 21,6                       |
| 14:00       | 20,1                       | 22,1                       |
| 15:00       | 20,3                       | 22,5                       |
| 16:00       | 20,2                       | 22,8                       |
| 17:00       | 19,8                       | 23,1                       |
| 18:00       | 19,3                       | 23,2                       |
| 19:00       | 18,2                       | 23,1                       |
| 20:00       | 16,2                       | 22,9                       |
| 21:00       | 14,8                       | 22,5                       |
| 22:00       | 14,0                       | 22,0                       |
| 23:00       | 13,4                       | 21,4                       |
| 0:00        | 13,4                       | 20,9                       |
| 1:00        | 13,0                       | 20,5                       |
| 2:00        | 12,7                       | 20,0                       |
| 3:00        | 12,1                       | 19,6                       |
| 4:00        | 11,7                       | 19,3                       |
| 5:00        | 11,3                       | 19,0                       |
| 6:00        | 11,2                       | 18,7                       |
| 7:00        | 13,2                       | 18,4                       |
| 8:00        | 15,4                       | 18,3                       |
| 9:00        | 17,4                       | 18,7                       |
| 10:00       | 19,0                       | 19,5                       |
| 11:00       | 19,9                       | 20,3                       |
| 12:00       | 20,3                       | 21,2                       |

**Tabla 15: Promedio de temperaturas Polideportivo**

A continuación, se presenta el gráfico de promedios horarios de temperatura interior y exterior correspondiente a la segunda semana de medición en el recinto POLIDEPORTIVO.

### 3.3.4: REPRESENTACION GRAFICA DE LA SEGUNDA SEMANA

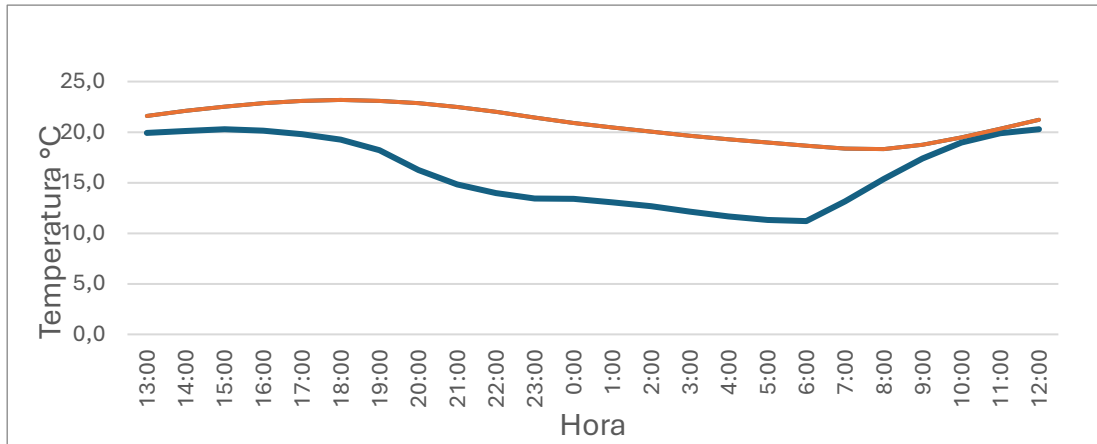


Gráfico 4: Semana 2 Promedio temperatura Interior vs. Exterior de los 7 días. (Polideportivo)

### 3.4: RADIACIÓN SOLAR

Según un informe que nos entrega el SINCA estos son los valores de radiación para nuestro primer día de ensayos.

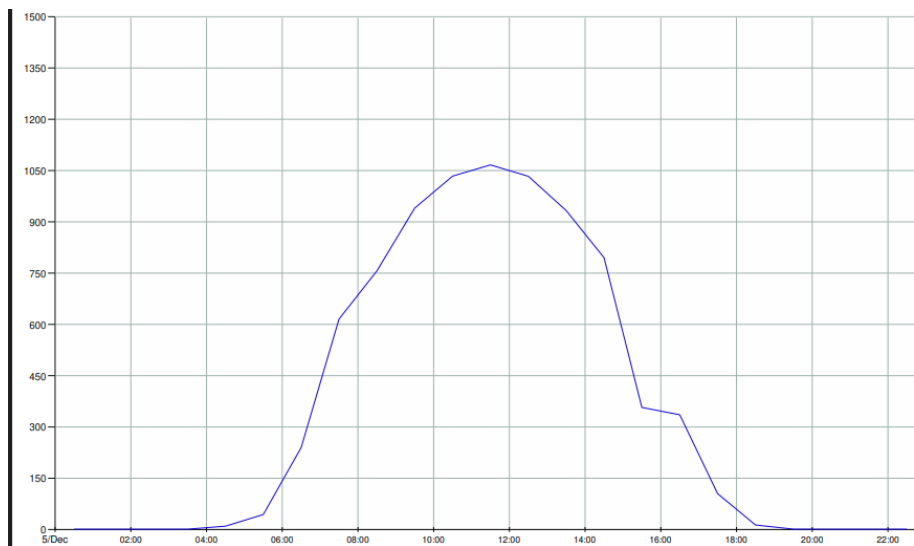
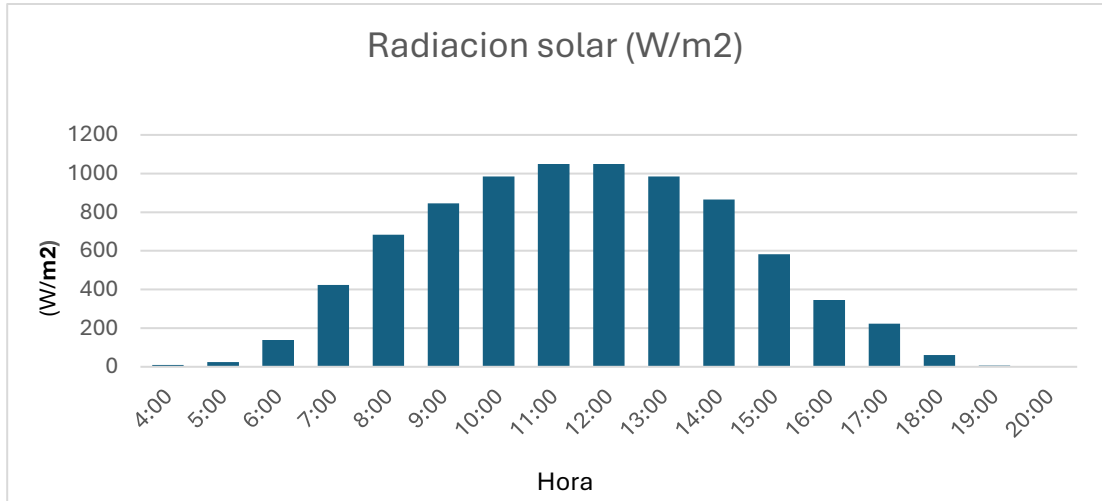


Ilustración 2: Informe Gráfico radiación solar (SINCA)

A continuación, Se presenta el grafico de radiación solar, correspondiente al primer día de medición.



**Gráfico 5: Radiación solar por hora**

Los valores de radiación solar serán procesados y utilizados como datos de entrada para la simulación térmica, permitiendo representar de manera más realista las condiciones climáticas a las que estuvieron expuestos los recintos durante el período de medición.

**CAPÍTULO 4: “Análisis de la simulación térmica mediante el modelo 1R–1C y comparación con datos medidos”**

#### 4.1: ANÁLISIS TRANSMITANCIA TÉRMICA DE LA ENVOLVENTE Y DE $H_{tot}$

A partir de la caracterización térmica de la envolvente de ambos recintos, se obtuvieron los valores de transmitancia térmica  $U$  correspondientes a cada uno de los elementos constructivos. Estos valores reflejan las diferencias propias de la materialidad, espesor y configuración constructiva de cada componente, y permiten describir el comportamiento térmico individual de la envolvente.

Calculamos la resistencia de cada elemento, a continuación, presento una tabla con los datos y valores de los materiales del muro delantero del Polideportivo.

##### 4.1.1: TRANSMITANCIA TÉRMICA (POLIDEPORTIVO)

| U1                     |         |               |       |
|------------------------|---------|---------------|-------|
| Elemento               | Espesor | Conductividad | Valor |
| Rsi                    |         |               | 0,05  |
| Fibroceemento exterior | 0,008   | 0,4           | 0,02  |
| pino 2x3"              | 0,076   | 0,12          | 0,63  |
| Osب.                   | 0,011   | 0,14          | 0,08  |
| Rse                    |         |               | 0,12  |

**Tabla 16: U1 Polideportivo**

Con la suma de resistencias obtenemos el valor de RT para cada U, obtenido ese valor determinamos  $U = 1/RT$ .

| Total RT |      |      |      |      |
|----------|------|------|------|------|
| RT 1     | RT 2 | RT 3 | RT 4 | RT 5 |
| 0,90     | 0,52 | 0,31 | 0,30 | 0,47 |

| Total U |      |      |      |      |
|---------|------|------|------|------|
| U1      | U2   | U3   | U4   | U5   |
| 1,11    | 1,93 | 3,20 | 3,29 | 2,11 |

**Tabla 17: Transmitancia térmica Total RT, Total.**

Finalmente calculamos el valor por área de cada U, para obtener así el U ponderado de nuestro elemento.

En relación con lo exigido por la **Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC)**, específicamente en el **artículo 4.1.10**, el valor de  $U_{ponderado} = 2,03 \text{ W/m}^2\text{K}$  obtenido para la envolvente del recinto analizado es **considerablemente superior** a los valores máximos exigidos actualmente por la normativa térmica chilena para edificaciones nuevas en la zona de Concepción. Este resultado es coherente con la configuración constructiva del recinto, donde predominan soluciones livianas y elementos sin aislación térmica significativa.

Desde el punto de vista normativo, este valor **no cumple** con los estándares exigidos para edificaciones nuevas. No obstante, en el contexto del presente estudio, el objetivo **no es verificar cumplimiento normativo**, sino caracterizar el comportamiento térmico real del recinto existente y utilizar dichos parámetros como datos para la simulación térmica mediante el modelo.

#### 4.1.2: HTOT ANÁLISIS Y RESULTADO (POLIDEPORTIVO)

| Dimensiones. |      |   |
|--------------|------|---|
| Largo        | 5,84 | m |
| Ancho        | 4,35 | m |
| Alto         | 2,58 | m |

| Areas (m2)      |              |
|-----------------|--------------|
| Muro lateral *2 | 35,6         |
| Muro trasero    | 11,3         |
| Muro delantero  | 11,3         |
| Techo           | 27,7         |
| Piso            | 25,4         |
| <b>Total</b>    | <b>111,3</b> |

| Htot            |            |
|-----------------|------------|
| Muro lateral *2 | 59,2       |
| Muro trasero    | 13,9       |
| Muro delantero  | 16,1       |
| Techo           | 16,5       |
| Piso            | 72,9       |
| <b>H Total</b>  |            |
| <b>178,6</b>    | <b>W/K</b> |

| U global    |              |
|-------------|--------------|
| <b>1,60</b> | <b>W/m2K</b> |

Tabla 18: U del recinto + H total (Polideportivo)

El recinto Polideportivo, correspondiente a una envolvente de tipo mixta, presentó una conductancia térmica total de **178,6 W/K** y una transmitancia térmica global de **1,60 W/(m<sup>2</sup>·K)**. El parámetro de conductancia térmica total representa el intercambio térmico por transmisión a través de la envolvente del recinto y permite cuantificar la magnitud de las pérdidas o ganancias de calor frente a una diferencia de temperatura entre el interior y el exterior.

#### 4.1.3: TRANSMITANCIA TÉRMICA (FABLAB)

| Cálculo de transmitancia termica Muro                                |         |               |             |
|--|---------|---------------|-------------|
| U1(Acero corrugado-Acero galvanizado-Poliestireno-Acero galvanizado- |         |               |             |
| Elemento   | Espesor | Conductividad | Valor       |
| Rsi  |         |               | 0,12        |
| Acero estructural  | 0,002   | 50            | 0,00        |
| Acero galvanizado  | 0,002   | 50            | 0,00        |
| Poliestireno   | 0,05    | 0,038         | 1,32        |
| Acero galvanizado  | 0,002   | 50            | 0,00        |
| Melamina   | 0,015   | 0,2           | 0,08        |
| Rse  |         |               | 0,05        |
|  |         | Rt            | 1,56        |
|  |         | <b>U1</b>     | <b>0,64</b> |

Tabla 19: Transmitancia térmica (FABLAB) U1

| Valor |                    | %           |                |
|-------|--------------------|-------------|----------------|
| U1    | 0,64               | 15%         |                |
| U2    | 0,64               | 85%         |                |
|       | <b>U ponderado</b> | <b>0,64</b> | <b>(w/m2K)</b> |

Tabla 20: U ponderado muro lateral (fablab)

El recinto FABLAB presentó una transmitancia térmica global de la envolvente de  $U_{global} = 0,64 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , valor que representa el intercambio térmico por transmisión entre el interior y el exterior a través de los distintos elementos del cerramiento. En términos generales, valores menores de  $U$  se asocian a una envolvente con mayor resistencia térmica y, por tanto, con menores pérdidas o ganancias de calor hacia el ambiente.

De manera referencial, y en relación con lo exigido por la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC), artículo 4.1.10, el valor global obtenido para la envolvente del recinto no se enmarca en los criterios de cumplimiento normativo para edificaciones nuevas, por lo que no se considera en cumplimiento respecto de dichas exigencias.

#### 4.1.4: HTOT ANÁLISIS Y RESULTADO (FABLAB).

| Dimensiones. |      |   |
|--------------|------|---|
| Largo        | 5,5  | m |
| Ancho        | 2,2  | m |
| Alto         | 2,52 | m |

| Areas (m2)      |             |
|-----------------|-------------|
| Muro lateral *2 | 27,7        |
| Muro trasero    | 5,5         |
| Techo           | 12,1        |
| Piso            | 12,1        |
| Ventanal int.   | 5,5         |
| <b>Total</b>    | <b>63,0</b> |

| Htot            |                 |
|-----------------|-----------------|
| Muro lateral *2 | 17,8            |
| Muro trasero    | 25,2            |
| Techo           | 7,9             |
| Piso            | 7,2             |
| Ventanal int.   | no se considera |
| <b>H Total</b>  |                 |
| <b>58,1</b>     | <b>W/K</b>      |

| U global    |              |
|-------------|--------------|
| <b>0,92</b> | <b>W/m2K</b> |

Tabla 21: U del recinto + H total (Fablab)

El recinto FABLAB presentó una **conductancia térmica total** de  $H_{tot} = 58,1$  W/K y una **transmitancia térmica global** de  $U_{global} = 0,92$  W/(m<sup>2</sup> · K). Estos valores reflejan un **menor intercambio térmico por transmisión** a través de la envolvente, lo que indica un comportamiento térmico más contenido frente a variaciones de la temperatura exterior.

Desde un punto de vista físico, el valor de  $H_{tot}$  implica que, ante una diferencia térmica de 1 °C entre el interior y el exterior, el recinto intercambiaría aproximadamente **58,1 W** por transmisión. Esta magnitud sugiere que las pérdidas o ganancias de calor a través de la envolvente son relativamente moderadas, favoreciendo una mayor estabilidad térmica interior.

## 4.2: REGISTRO GRAFICO PRIMERA SEMANA

### 4.2.1: EVOLUCIÓN TÉRMICA REGISTRADA DURANTE LA PRIMERA SEMANA DE MEDICIÓN (ESCENARIO SIN PERTURBACIONES) FABLAB.

El gráfico de promedios horarios correspondiente a la primera semana de medición en el recinto FABLAB permite analizar el comportamiento térmico del recinto bajo condiciones base, sin la presencia de aportes térmicos internos.

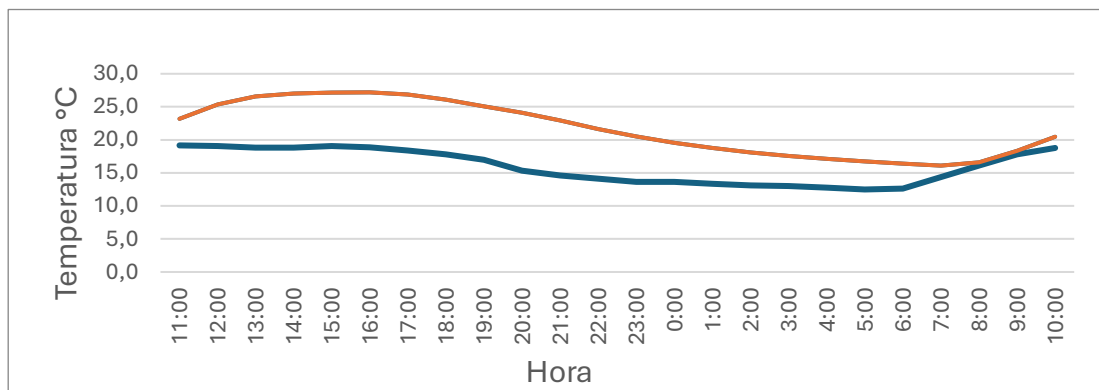


Gráfico 6: Semana 1 (FabLab)

En este escenario, la evolución de la temperatura interior se encuentra fuertemente condicionada por la variación de la temperatura exterior, lo que evidencia una relación directa entre ambas variables.

No obstante, se observa que la temperatura interior presenta una amplitud térmica menor en comparación con la temperatura exterior. Mientras la curva exterior exhibe variaciones más pronunciadas a lo largo del día, la temperatura interior se mantiene dentro de un rango más acotado, lo que indica un efecto de atenuación térmica generado por la envolvente del recinto.

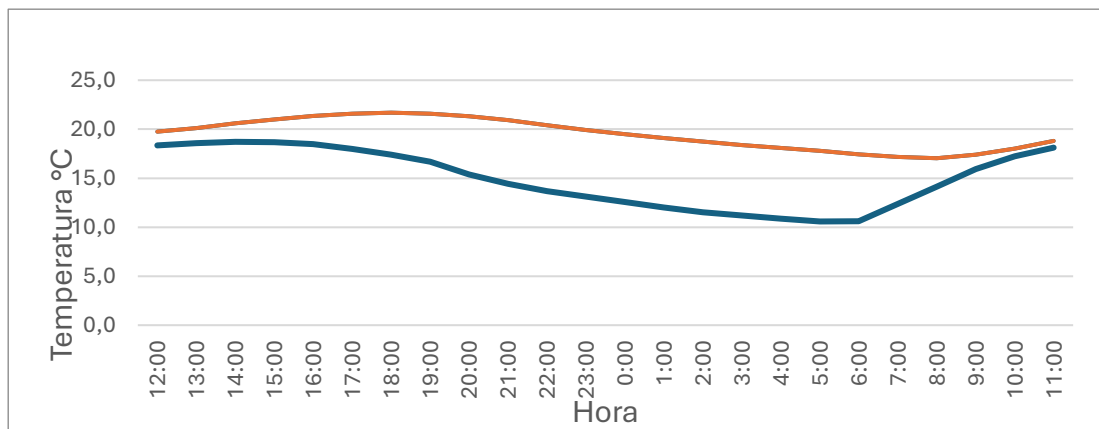
Adicionalmente, se aprecia un **desfase temporal** entre los valores máximos y mínimos de la temperatura exterior y la respuesta de la temperatura interior. Este desfase refleja la presencia de **inercia térmica**, la cual retrasa la respuesta del recinto frente a las

variaciones climáticas exteriores y contribuye a una mayor estabilidad térmica en el interior.

En términos generales, el comportamiento observado en la primera semana resulta coherente con un escenario sin perturbaciones externas y constituye una condición base adecuada para comprobar la certeza del modelo térmico, al permitir analizar la respuesta natural del recinto frente a las variaciones climáticas reales.

#### **4.2.2: EVOLUCIÓN TÉRMICA REGISTRADA DURANTE LA PRIMERA SEMANA DE MEDICIÓN (ESCENARIO SIN PERTURBACIONES) POLIDEPORTIVO.**

El gráfico de promedios horarios correspondiente a la primera semana de medición en el recinto Polideportivo permite analizar el comportamiento térmico del recinto bajo condiciones base, sin la incorporación de aportes térmicos internos.



**Gráfico 7: Semana 1 (Polideportivo)**

En este escenario, la evolución de la temperatura interior se encuentra principalmente influenciada por las condiciones climáticas exteriores.

Al igual que en el recinto FABLAB, se observa una relación directa entre la temperatura exterior y la temperatura interior, aunque con un comportamiento térmico diferenciado. La temperatura interior presenta una **amplitud térmica reducida** en comparación con la

temperatura exterior, lo que evidencia un efecto de **atenuación térmica** asociado a las características de la envolvente del recinto.

Durante el período vespertino y nocturno, la temperatura interior desciende de manera progresiva, alcanzando sus valores mínimos durante las primeras horas de la mañana. Sin embargo, estos valores se mantienen por sobre los mínimos exteriores, lo que sugiere la

presencia de una **capacidad de almacenamiento térmico** que contribuye a moderar las pérdidas de calor.

A diferencia del recinto FABLAB, el recinto Polideportivo presenta una **mayor amplitud térmica interior**, lo que indica una respuesta más sensible a las variaciones de la temperatura exterior. Este comportamiento puede asociarse a diferencias en la geometría, el volumen interior y la materialidad de la envolvente, las cuales influyen directamente en la inercia térmica del sistema.

### **4.3: ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO INTERIOR.**

#### **4.3.1: RECINTO FABLAB VS. RECINTO POLIDEPORTIVO (SEMANA 1, SIN PERTURBACIONES).**

Las curvas de temperatura promedio por hora correspondientes a la primera semana de medición permiten analizar el comportamiento térmico de ambos recintos bajo condiciones base, sin aportes internos de calor. La curva que inicia a las 11:00 horas

corresponde al recinto FABLAB, mientras que la que inicia a las 12:00 horas corresponde al recinto Polideportivo.

En el caso del recinto FABLAB, se observa que la temperatura interior presenta una variación diaria moderada, manteniéndose relativamente estable frente a los cambios de la temperatura exterior. La diferencia entre ambas curvas se conserva durante gran parte del ciclo diario, evidenciando una menor sensibilidad del recinto a las variaciones térmicas del ambiente exterior. Este comportamiento es coherente con los parámetros térmicos obtenidos previamente, particularmente con su menor valor de transmitancia térmica global y de conductancia térmica total ( $H_{tot}$ ), lo que indica un intercambio térmico reducido a través de la envolvente.

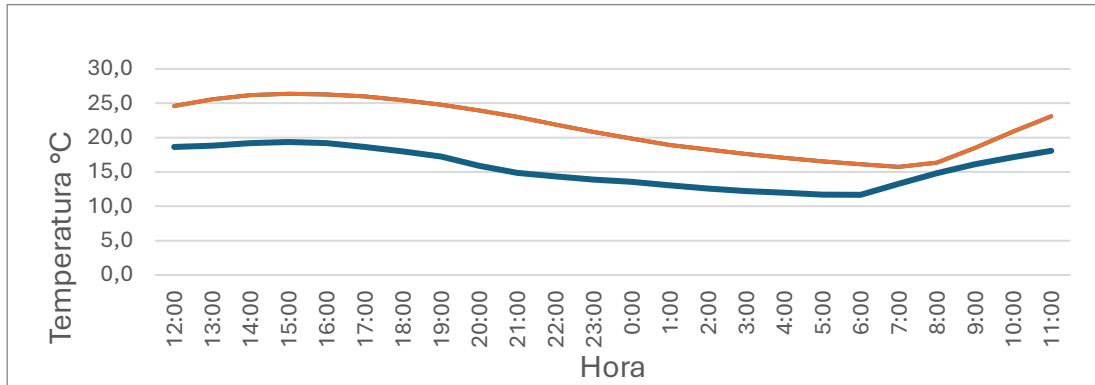
Por el contrario, el recinto Polideportivo presenta una mayor amplitud térmica diaria y una respuesta más marcada frente a las variaciones de la temperatura exterior. Durante las horas nocturnas y de la madrugada, la temperatura interior desciende de forma más pronunciada, acercándose al comportamiento de la temperatura exterior. Este fenómeno es consistente con los valores más elevados de transmitancia térmica global y  $H_{tot}$  determinados para este recinto, los cuales reflejan una envolvente con mayor intercambio térmico por transmisión.

Al comparar ambos recintos, se evidencia que el FABLAB presenta un comportamiento térmico más estable, con menores fluctuaciones interiores y una mayor desacople respecto de la temperatura exterior. En contraste, el Polideportivo muestra una respuesta térmica más dependiente de las condiciones climáticas exteriores, lo que se traduce en una mayor pérdida de calor durante las horas de menor temperatura exterior.

#### **4.4: REGISTRO GRAFICO SEGUNDA SEMANA**

##### **4.4.1: EVOLUCIÓN TÉRMICA REGISTRADA DURANTE LA SEGUNDA SEMANA DE MEDICIÓN (ESCENARIO CON CALEFACCIÓN) FABLAB.**

El gráfico de promedios horarios correspondiente a la segunda semana de medición en el recinto FABLAB permite analizar el comportamiento térmico del recinto bajo un escenario con aporte de calefacción.

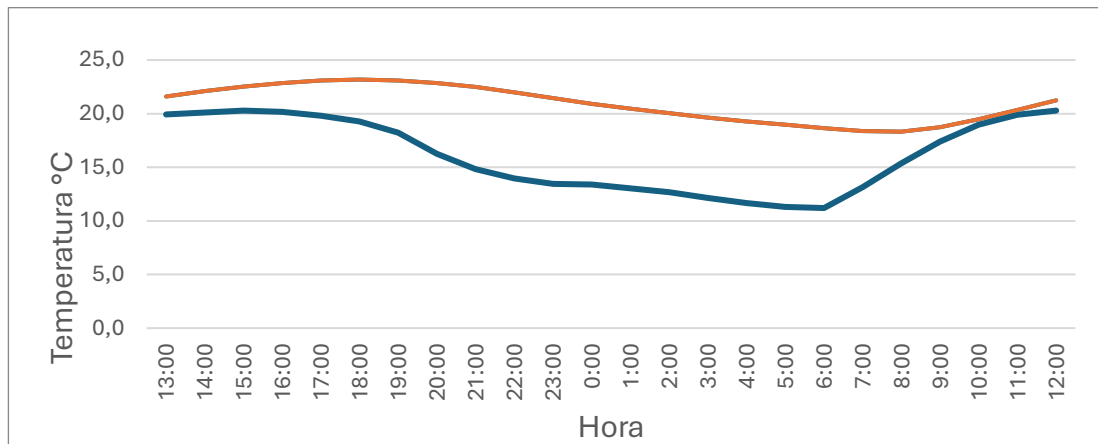


**Gráfico 8: Semana 2 (FabLab)**

En comparación con la primera semana, se observa una modificación en la evolución de la temperatura interior, atribuible a la incorporación de una ganancia térmica interna.

La temperatura interior presenta valores promedio superiores a los registrados en condiciones base, evidenciando el efecto directo del sistema de calefacción sobre el comportamiento térmico del recinto. A pesar de ello, la evolución diaria mantiene una forma similar a la de la temperatura exterior, lo que indica que las condiciones climáticas continúan influyendo en la respuesta térmica del recinto.

#### **4.4.2: EVOLUCIÓN TÉRMICA REGISTRADA DURANTE LA SEGUNDA SEMANA DE MEDICIÓN (ESCENARIO CON CALEFACCIÓN) POLIDEPORTIVO.**



**Gráfico 9: Semana 2 (Polideportivo)**

El gráfico correspondiente a la segunda semana de medición en el recinto Polideportivo permite analizar el comportamiento térmico del recinto bajo un escenario con aporte de calefacción. En comparación con la primera semana, se observa un incremento general de la temperatura interior, evidenciando la influencia de las ganancias térmicas internas sobre la evolución térmica del recinto.

#### **4.5: ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO INTERIOR**

##### **4.5.1: RECINTO FABLAB VS. RECINTO POLIDEPORTIVO (SEMANA 2, CON CALEFACCION).**

Los gráficos de promedios horarios correspondientes a la segunda semana de medición, tanto para el recinto FABLAB como para el recinto Polideportivo, permiten observar el efecto de un escenario con aporte de calefacción sobre la temperatura interior. En ambos casos, la curva de color naranja representa la temperatura interior promedio por hora, mientras que la curva azul corresponde a la temperatura exterior.

En comparación con la primera semana de medición, se aprecia un aumento general de la temperatura interior en ambos recintos, lo que evidencia la influencia directa de una ganancia térmica interna asociada al uso de calefacción. Asimismo, la evolución diaria de la temperatura interior mantiene una relación con la variación de la temperatura exterior, aunque con valores interiores más elevados y una reducción parcial de la amplitud térmica, especialmente durante el período nocturno y las primeras horas de la mañana.

No obstante, durante el desarrollo de los ensayos correspondientes a esta segunda semana se identificaron **intervenciones no controladas**, tanto en el funcionamiento del equipo de calefacción como en las condiciones de ventilación de los recintos. Estas acciones alteraron las condiciones originalmente definidas para el ensayo, introduciendo perturbaciones externas que afectan la consistencia, repetibilidad y representatividad de los registros obtenidos.

En consecuencia, los resultados de la segunda semana **no se consideran válidos para el análisis cuantitativo ni para Verificar la aplicabilidad del modelo térmico 1R-1C**, y no serán utilizados en la comparación entre curvas medidas y simuladas. Su inclusión en el presente capítulo tiene un carácter descriptivo y contextual, permitiendo ilustrar cualitativamente el efecto de una ganancia térmica interna sobre la evolución de la temperatura interior, pero sin constituir una base confiable para la calibración o evaluación del modelo.

De este modo, el análisis y la evaluación del modelo térmico se desarrollarán exclusivamente a partir de los registros obtenidos durante la primera semana de medición, en la cual se aseguraron condiciones controladas y coherentes con los supuestos del modelo 1R-1C.

## 4.6: ANALISIS

### 4.6.1: ANÁLISIS DE LA SIMULACIÓN TÉRMICA – PRIMERA SEMANA (RECINTO POLIDEPORTIVO)

El siguiente gráfico de curva presenta la simulación térmica del recinto Polideportivo durante la primera semana, comparando la temperatura interior promedio medida con los resultados del modelo 1R–1C resuelto mediante los métodos numéricos de Euler y Runge–Kutta de cuarto orden (RK4). En el gráfico se utilizó un perfil de 24 horas y se considera un valor de conductancia térmica total de 178,6 W/K, el cual representa el intercambio térmico global del recinto con el exterior por transmisión.

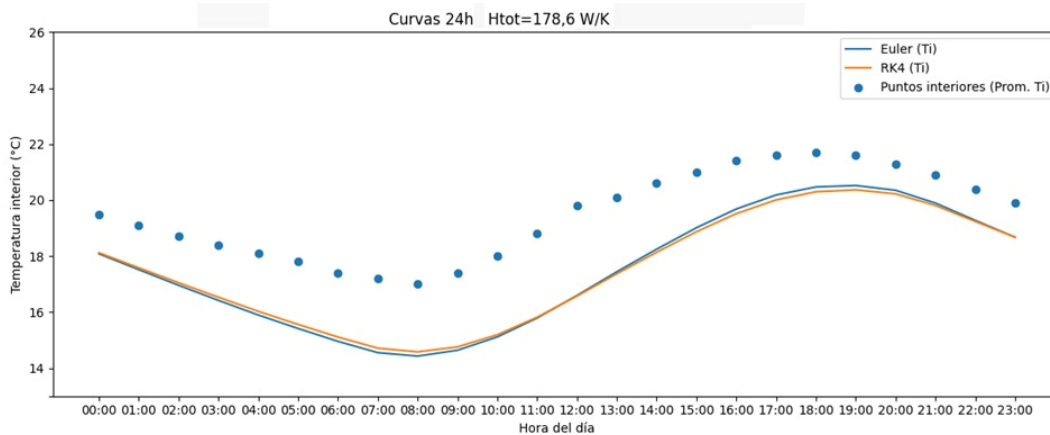


Gráfico 10: Simulaciones térmica (Polideportivo)

En el caso del Polideportivo ( $H_{tot} = 178,6$  W/K), la comparación entre la temperatura interior medida y las curvas simuladas evidencia que el modelo 1R–1C representa correctamente la forma general del ciclo térmico diario. En términos generales, ambos métodos numéricos reproducen adecuadamente la tendencia de la temperatura interior: descenso progresivo durante la noche y madrugada, incremento sostenido desde la mañana hasta alcanzar un máximo en la tarde, y finalmente una fase de enfriamiento hacia la noche. En este sentido, el modelo captura de manera coherente la dinámica básica del recinto y su respuesta global frente a condiciones promedio.

No obstante, al contrastar las curvas simuladas con los registros experimentales, se observa una subestimación sistemática de la temperatura interior a lo largo del día. Es decir, los valores medidos se mantienen por encima de las predicciones del modelo en la mayoría de las horas, evidenciando una diferencia relativamente persistente. Desde una perspectiva cuantitativa, este comportamiento es consistente con un sesgo

negativo ( $MBE < 0$ ), lo que implica que el modelo, tal como está parametrizado y alimentado con sus condiciones de borde, tiende a representar un nivel térmico interior más bajo que el observado. En consecuencia, se esperaría que los indicadores globales de ajuste (MAE/RMSE) se sitúen en un orden de magnitud cercano a  $\sim 2$  °C, con intervalos horarios en que la brecha puede aproximarse a 2–3 °C, tal como se aprecia en el gráfico.

Esta subestimación se refleja también en los extremos diarios: tanto el mínimo ( $\Delta T_{min}$ ) como, con mayor notoriedad, el máximo ( $\Delta T_{max}$ ) resultan subestimados, siendo especialmente visible que el  $T_{max}$  medido supera al  $T_{max}$  simulado. Este punto es relevante porque indica que la discrepancia no corresponde únicamente a un error puntual, sino a un desplazamiento en el nivel de temperatura que podría estar asociado a la subrepresentación de ganancias térmicas efectivas o a una simplificación de los mecanismos reales de intercambio. A pesar de lo anterior, la sincronía temporal se mantiene favorable: el desfase del peak ( $\Delta t_{peak}$ ) se observa bajo, ya que el momento del máximo simulado ocurre cercano al máximo medido. Por consiguiente, el problema dominante no parece estar en el *timing* de la respuesta, sino en el nivel térmico estimado por el modelo (sesgo).

Desde una mirada física y contextual, este resultado es coherente con la condición del recinto y con factores reales que pueden influir en la temperatura interior aun cuando no existan ganancias intencionales. Entre ellos se consideran posibles infiltraciones no controladas, presencia de puentes térmicos en uniones constructivas y variaciones en las condiciones convectivas exteriores asociados al viento, los cuales modifican el intercambio térmico a través de la envolvente. Adicionalmente, las condiciones climáticas exteriores utilizadas como referencia provienen de una estación meteorológica situada en el Aeropuerto de Concepción, mientras que el recinto evaluado se encuentra emplazado en Hualpén; esta diferencia puede introducir microvariaciones locales (radiación efectiva, nubosidad y exposición al viento) que influyen en el comportamiento real y que no siempre quedan reflejadas en los datos de borde empleados.

En síntesis, la simulación del Polideportivo comprueba el uso del modelo 1R–1C en cuanto a su capacidad de reproducir la tendencia diaria y la respuesta temporal del recinto (forma de la curva y ocurrencia del peak). Al mismo tiempo, la presencia de una subestimación sistemática delimita el alcance del modelo para este caso y fundamenta la discusión técnica: para reducir el sesgo se requiere una representación más precisa de forzantes y pérdidas/ganancias reales (por ejemplo, infiltraciones, condiciones convectivas y representatividad climática local). En consecuencia, el resultado fortalece el análisis, ya que permite identificar con claridad qué aspectos del contexto real explican las diferencias observadas y qué mejoras serían necesarias para una calibración más fina.

#### 4.6.2: ANÁLISIS DE LA SIMULACIÓN TÉRMICA – PRIMERA SEMANA (RECINTO FABLAB)

El siguiente gráfico de curva presenta la comparación entre la temperatura interior promedio medida durante la primera semana de ensayo y las curvas simuladas mediante el modelo térmico 1R–1C, resuelto a través de los métodos numéricos de Euler explícito y Runge–Kutta de cuarto orden (RK4), considerando un perfil promedio de 24 horas.

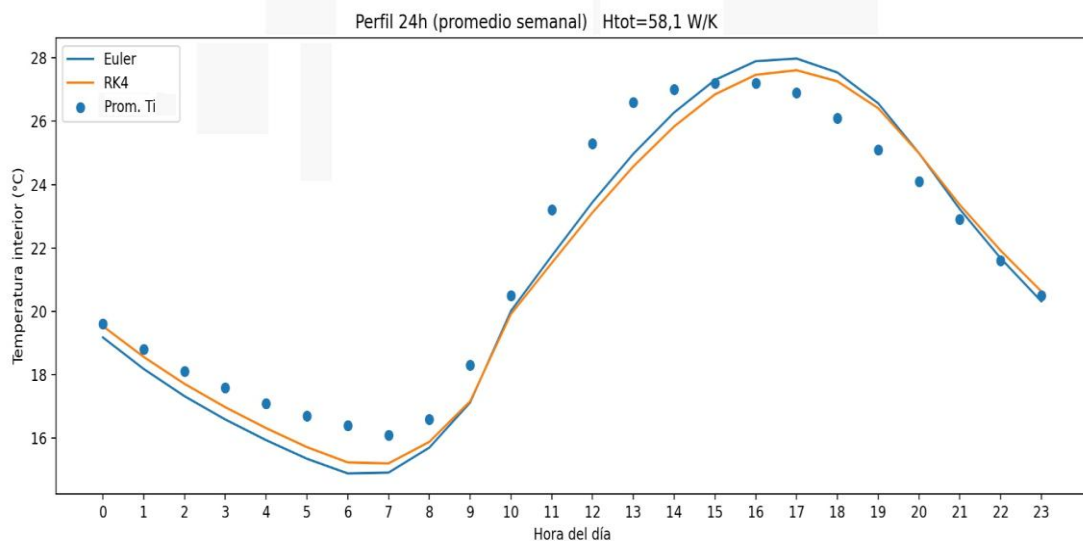


Gráfico 11: Simulación térmica (Fablab)

En el caso del **recinto FABLAB** ( $H_{tot} = 58,1 \text{ W/K}$ ), la comparación entre la temperatura interior **medida** y las curvas **simuladas** confirma un comportamiento coherente con un recinto de **bajo intercambio térmico**. En términos generales, se observa una **buena concordancia** entre los registros experimentales y el modelo 1R–1C, ya que ambas simulaciones reproducen adecuadamente la **tendencia diaria**: descenso nocturno, incremento progresivo durante la mañana y un **máximo térmico** alcanzado en horas de la tarde. Esta consistencia en la forma de la curva es un primer indicador relevante, porque demuestra que el modelo captura el funcionamiento térmico global del recinto bajo condiciones promedio.

Al analizar el ajuste con un enfoque más técnico, se identifica un **sesgo levemente negativo (MBE < 0)** concentrado principalmente en el tramo **nocturno–madrugada**. En la práctica, esto significa que el modelo tiende a **subestimar** la temperatura interior en las horas de menor carga térmica, lo que se refleja en un  **$\Delta T_{\min}$  subestimado** (el mínimo simulado resulta más bajo que el mínimo medido). Este comportamiento es esperable en modelos simplificados, ya que el 1R–1C representa la inercia térmica del recinto de forma agregada y, además, puede no incorporar de manera explícita **ganancias térmicas residuales** o condiciones reales del entorno interior que moderan el enfriamiento nocturno. No obstante, esta diferencia se mantiene **acotada** y no altera la tendencia general del comportamiento térmico observado.

En el periodo diurno, particularmente entre **media mañana y la tarde**, el desempeño mejora de forma evidente: las curvas simuladas muestran una evolución **muy cercana** a los valores medidos, lo que indica que el modelo representa adecuadamente la respuesta del recinto frente a las condiciones exteriores promedio en las horas de mayor variación térmica. En este tramo, el  **$\Delta T_{\max}$  se mantiene cercano**, con una diferencia moderada menor que la observada en el mínimo, lo que respalda que el modelo reproduce de manera razonable la **amplitud térmica diaria** en su zona superior. Además, el método **Runge–Kutta de cuarto orden (RK4)** presenta un ajuste **ligeramente más próximo** a los datos experimentales que el método de **Euler explícito**, especialmente en la zona del máximo térmico, lo que es consistente con una mayor estabilidad y precisión numérica al trabajar con series horarias.

Un punto especialmente importante para tomar en cuenta es la **sincronía temporal**: el **desfase del peak ( $\Delta t_{\text{peak}}$ ) es bajo** (del orden de **0 a 1 hora**). Por consiguiente, el modelo no solo aproxima la magnitud del calentamiento, sino también el **momento** en que ocurre la temperatura máxima, lo que demuestra que la dinámica del sistema (relación entre intercambio térmico e inercia) está correctamente representada a escala horaria.

Finalmente, el valor de **conductancia térmica total ( $H_{\text{tot}}$ )** utilizado en la simulación permite reproducir un perfil térmico interior **coherente** con el comportamiento real del

recinto FABLAB durante condiciones **sin perturbaciones internas**. En consecuencia, el conjunto de resultados sostiene que el modelo 1R–1C es totalmente funcional **como herramienta simplificada** para describir el comportamiento térmico promedio del recinto en estudio. Si bien se observa una subestimación nocturna leve —atribuible a simplificaciones del modelo y a efectos reales no idealizados—, el ajuste global, la cercanía en el máximo diario y el bajo desfase del peak entregan una base sólida para considerar esta etapa como una **comprobación satisfactoria del desempeño del modelo** dentro del contexto local y para sustentar el análisis comparativo desarrollado en las secciones siguientes.

#### **4.7: SÍNTESIS, APORTES DEL ESTUDIO Y PROYECCIONES DE MEJORA.**

##### **4.7.1: SÍNTESIS DEL ESTUDIO A PARTIR DE LOS ANÁLISIS.**

A partir de los resultados obtenidos en ambos recintos, se concluye que el **modelo térmico 1R–1C** es **capaz de representar de manera coherente la dinámica diaria de la temperatura interior** bajo condiciones reales y con datos horarios. En ambos casos, las simulaciones reproducen la **tendencia global del ciclo térmico** (enfriamiento nocturno, calentamiento diurno y peak vespertino), lo que demuestra que el modelo captura el comportamiento fundamental del intercambio térmico entre el recinto y el ambiente exterior.

En el **Polideportivo**, si bien el modelo reproduce correctamente la **forma** de la curva y la **ocurrencia del peak** (desfase bajo), se observa una **subestimación sistemática** a lo largo del día. Este patrón evidencia que, en recintos con mayor intercambio térmico y mayor complejidad real, el esquema simplificado puede mantener la dinámica general, pero tiende a presentar **sesgos en el nivel térmico**, atribuibles a factores no totalmente representados: infiltraciones, puentes térmicos, condiciones convectivas por viento y representatividad climática del punto meteorológico usado como condición de borde. En el **FABLAB**, en cambio, el ajuste es más robusto: el modelo reproduce de

forma cercana la evolución diurna, con un sesgo nocturno leve, acotado y concentrado en el mínimo, lo que refuerza la validez del enfoque en recintos con comportamiento más estable. En consecuencia, el estudio **corroborar el uso del modelo 1R-1C como herramienta simplificada**, demostrando que entrega una aproximación consistente del comportamiento térmico interior en el contexto local, y que sus discrepancias son explicables por condiciones reales no idealizadas.

Un aporte importante del trabajo es que demuestra que, aun con un modelo de baja complejidad, es posible obtener resultados útiles para **evaluación térmica temprana**, especialmente cuando el propósito es comparar alternativas, identificar tendencias, y anticipar el desempeño térmico de un recinto antes de llegar a etapas de ingeniería de detalle.

#### **4.7.2: APLICACIÓN PRÁCTICA: UTILIDAD PARA ANTEPROYECTO Y TOMA DE DECISIONES.**

Desde un enfoque aplicado, el modelo 1R-1C es una herramienta especialmente valiosa en **etapas de anteproyecto y diseño preliminar**, porque permite realizar simulaciones rápidas con pocos parámetros de entrada, entregando una primera estimación del comportamiento térmico interior. Esto facilita:

- **Comparar alternativas de envolvente** (mejores materiales, espesores, soluciones constructivas) sin necesidad de recurrir desde el inicio a simulaciones complejas.
- **Reducir incertidumbre técnica** en decisiones tempranas, donde se definen la mayoría de los costos y el desempeño final del proyecto.
- **Optimizar recursos**, ya que anticipar problemas térmicos desde el diseño evita correcciones tardías y medidas “reactivas” en obra.

En consecuencia, aplicar esta metodología antes de construir puede traducirse directamente en **economía de tiempo y dinero**: se reducen modificaciones posteriores, se disminuye el riesgo de sobredimensionar soluciones (gasto innecesario) o subdimensionarlas (discomfort y retrabajos). Además, un diseño térmicamente más controlado mejora la probabilidad de alcanzar **condiciones interiores confortables**, lo que se refleja en **mayor satisfacción del usuario** y un mejor desempeño del edificio en uso.

Desde la perspectiva de una empresa, disponer de una herramienta simple y comprobada para análisis térmico temprano se transforma en una ventaja competitiva: permite presentar propuestas con mayor respaldo técnico, reducir incertidumbre para el cliente y entregar recintos más confortables. Finalmente, esto puede derivar en **mayor prestigio**, mejor percepción de calidad y confianza, al demostrar que las decisiones de diseño fueron sustentadas por análisis y no solo por experiencia o intuición.

#### **4.7.3: MEJORAS Y LÍNEAS DE TRABAJO PARA ESTUDIOS FUTUROS (LO MÁS RELEVANTE)**

Para fortalecer el modelo y reducir el sesgo observado —especialmente en el Polideportivo— se recomienda que futuras investigaciones incorporen mejoras en tres niveles:

##### **4.7.3.1: REPRESENTACIÓN MÁS REALISTA DE CONDICIONES DE BORDE**

- Utilizar datos meteorológicos **más representativos del emplazamiento** (estación más cercana o medición local) o, al menos, incorporar una discusión cuantitativa de la diferencia entre ubicación real y estación de referencia.
- Refinar el tratamiento de **radiación solar efectiva**, considerando orientación, factores de exposición/sombreamiento y área efectiva de absorción/transmisión.

#### **4.7.3.2: INCORPORACIÓN EXPLÍCITA DE VENTILACIÓN/INFILTRACIÓN (HVE)**

- Estimar infiltraciones o renovaciones de aire (ACH) mediante procedimientos experimentales (por ejemplo, a partir de medición de CO<sub>2</sub> o ensayos controlados), para introducir un término de pérdidas/ganancias por aire que hoy puede estar “oculto” dentro del sesgo.

### **4.8: CONCLUSIÓN – CAPÍTULO 1**

#### **4.8.1: BASE TEÓRICA DEL MODELO 1R–1C, FORMULACIÓN MATEMÁTICA Y APLICACIÓN.**

En este capítulo se establece la base física y matemática necesaria para sustentar el modelo térmico 1R–1C como aproximación dinámica de la temperatura interior, articulando la analogía termo–eléctrica, el principio de conservación de energía y la expresión del flujo por transmisión mediante la conductancia global (**H<sub>tot</sub>**) como elementos centrales del balance energético del recinto. En consecuencia, el marco conceptual presentado permite justificar que el comportamiento interior puede representarse, a escala horaria, mediante un sistema de baja complejidad, siempre que

se mantengan condiciones compatibles con sus supuestos (nodo único, respuesta promedio del aire interior y simplificación del intercambio real).

Por consiguiente, el aporte principal del capítulo es delimitar claramente el **alcance** del 1R-1C: es adecuado para reproducir la **tendencia diaria** y la respuesta temporal global, pero puede perder precisión cuando el recinto presenta fenómenos no idealizados (infiltraciones variables, heterogeneidad de la envolvente, convección por viento, ganancias internas no controladas o radiación efectiva distinta de la asumida). Finalmente, el capítulo deja una base sólida para la simulación posterior, pero para cerrar con mayor fuerza técnica conviene reforzar dos aspectos: (i) explicitar, desde el inicio, si **H<sub>tot</sub>** se usa “solo por transmisión” o incluye ventilación/infiltración, y (ii) declarar de manera operativa qué significa “validación” (métricas y criterio).

## **4.9: CONCLUSIÓN – CAPÍTULO 2**

### **4.9.1: CARACTERIZACIÓN DE RECINTOS Y DEFINICIÓN DEL PLAN DE MEDICIÓN TÉRMICA.**

Este capítulo estructura el estudio experimental a partir de la caracterización física de los recintos (Polideportivo y FABLAB), la definición de variables relevantes y la planificación de una campaña de medición de dos semanas con instrumentación definida. En consecuencia, el diseño metodológico permite vincular el comportamiento térmico observado con parámetros de borde (temperatura exterior, radiación) y con propiedades globales del recinto que alimentan el modelo 1R-1C.

Por consiguiente, el capítulo cumple una función crítica: asegurar trazabilidad entre “lo que se mide” y “lo que se simula”. Sin embargo, para enfrentar una comisión exigente, lo más sensible aquí suele ser la **representatividad**: ubicación exacta del sensor (altura, distancia a muros/ventanas, zonas de estratificación), condiciones reales del entorno y justificación de por qué la estación meteorológica elegida representa el emplazamiento. Finalmente, fortalecer este capítulo con un esquema único y estándar de instalación

(croquis + foto + coordenadas internas del recinto) reduce mucho el riesgo de observaciones del tipo “el dato no es comparable con el modelo”.

#### **4.10: CONCLUSIONES.**

##### **4.10.1: CONCLUSIÓN – CAPÍTULO 1: BASE TEÓRICA DEL MODELO 1R–1C, FORMULACIÓN MATEMÁTICA Y APLICACIÓN**

En este capítulo se consolida el sustento físico y matemático del modelo 1R–1C como aproximación dinámica para representar la temperatura interior a escala horaria. La formulación permite entender, de manera clara, cómo el intercambio térmico global (conductancia total) y la inercia térmica del recinto determinan la evolución de la temperatura interior, entregando un marco coherente para interpretar los resultados posteriores.

En consecuencia, el capítulo cumple adecuadamente su propósito al delimitar el alcance del modelo: es una herramienta de baja complejidad capaz de capturar la tendencia diaria y la respuesta temporal global del recinto. Por consiguiente, para “cerrar” este capítulo con mayor solidez frente a comisión, conviene dejar explícitos desde el inicio dos puntos que suelen ser cuestionados: (i) qué incluye exactamente la conductancia total utilizada (si corresponde solo a transmisión o si incorpora efectos de ventilación/infiltración), y (ii) bajo qué criterio se considerará que el modelo queda comprobado (métricas y umbral de aceptación). Finalmente, con esas precisiones, el capítulo queda robusto como base formal para el procedimiento experimental y la simulación.

##### **4.10.2: CONCLUSIÓN – CAPÍTULO 2: CARACTERIZACIÓN DE RECINTOS Y DEFINICIÓN DEL PLAN DE MEDICIÓN TÉRMICA**

Este capítulo estructura correctamente el diseño experimental: caracteriza los recintos, define variables relevantes y plantea una campaña de medición que permite conectar el comportamiento térmico observado con condiciones exteriores y parámetros globales que alimentan el modelo. En consecuencia, se establece una línea metodológica lógica entre “condiciones reales” y “parámetros de simulación”, lo que es clave para que el análisis comparativo tenga sentido.

Por consiguiente, el punto más sensible ante una revisión crítica es la representatividad del registro: cómo y dónde se midió la temperatura interior, si el punto de medición refleja el “promedio térmico” del recinto, y si las condiciones exteriores usadas como borde son realmente comparables con el emplazamiento. Finalmente, este capítulo se fortalece mucho si incorpora un estándar de instalación único y verificable (esquema + registro fotográfico), además de una breve justificación técnica de la representatividad de los datos exteriores, de modo que la comisión no pueda cuestionar la comparabilidad entre medición y simulación.

#### **4.10.3: CONCLUSIÓN – CAPÍTULO 3: EJECUCIÓN DEL PROCEDIMIENTO Y OBTENCIÓN DE DATOS/VARIABLES PARA SIMULACIÓN**

En este capítulo se ejecuta el procedimiento experimental y se obtiene el insumo más valioso del trabajo: datos horarios reales, junto con un proceso replicable para transformar geometría y materialidad en parámetros térmicos utilizables por el modelo 1R–1C. En consecuencia, el aporte central es metodológico y práctico: se muestra cómo pasar desde la envolvente a parámetros globales (U por elemento, áreas, conductancia total) que permiten simular.

Por consiguiente, el aspecto crítico a blindar es la trazabilidad numérica: que el lector pueda seguir sin ambigüedades la cadena “capas constructivas → U → áreas →

conductancia total adoptada → simulación”, con consistencia entre secciones. Si existe más de un criterio de cálculo (por ejemplo, valores teóricos versus valores adoptados para simular), debe justificarse de forma directa y con una tabla-resumen única por recinto, indicando qué se adopta y por qué. Finalmente, incorporar esa tabla (aunque sea en anexos) reduce de manera importante las observaciones típicas de comisión sobre coherencia y replicabilidad.

#### **4.10.4: CONCLUSIÓN – CAPÍTULO 4: SIMULACIÓN 1R-1C Y COMPARACIÓN CON MEDICIONES**

Este capítulo cumple el objetivo central del estudio: contrastar mediciones reales con las curvas simuladas y evaluar el desempeño del modelo 1R-1C bajo condiciones locales. En términos generales, el resultado más defendible es que el modelo reproduce correctamente la forma del ciclo diario y la respuesta temporal (enfriamiento nocturno, calentamiento diurno y peak), lo que confirma que la dinámica principal del intercambio térmico está representada.

En consecuencia, el análisis también permite identificar el límite del enfoque simplificado cuando se enfrenta a recintos con mayor complejidad real: puede aparecer un sesgo persistente en el nivel térmico (subestimación o sobreestimación) aun cuando el momento del peak se mantenga cercano. Por consiguiente, para que la conclusión quede “cerrada” y sea incuestionable, este capítulo debe respaldarse con métricas formales de ajuste (MAE, RMSE, MBE, error en  $T_{max}/T_{min}$  y desfase del peak) presentadas en una tabla clara y con un criterio explícito de aceptación. Finalmente, con esa cuantificación, el trabajo no solo muestra que el modelo describe tendencias, sino que establece con precisión cuándo y en qué condiciones el modelo resulta suficientemente confiable para análisis horarios.

#### **4.10.5: CONCLUSIÓN GENERAL DEL TRABAJO (PARA CIERRE DEL DOCUMENTO)**

A partir del conjunto de resultados, se concluye que el modelo 1R–1C constituye una vía técnicamente consistente para representar el comportamiento térmico interior a escala horaria en el contexto local, siempre que se respeten sus supuestos y se asegure trazabilidad entre medición, parámetros adoptados y condiciones de borde. En consecuencia, el principal aporte del estudio es demostrar una metodología simple, replicable y de bajo costo computacional, capaz de entregar curvas térmicas útiles para análisis comparativos y evaluación temprana.

Por consiguiente, su mayor valor práctico se proyecta en etapas de anteproyecto: permite explorar alternativas de envolvente, anticipar tendencias de confort y orientar decisiones de diseño sin recurrir desde el inicio a herramientas complejas o de alto costo. Finalmente, este enfoque puede traducirse en ahorro de tiempo y recursos en proyectos reales (al disminuir rediseños y medidas correctivas tardías) y en una mejora del confort interior esperado; en términos de gestión, esto fortalece la propuesta técnica hacia el cliente y contribuye a elevar la percepción de calidad y el prestigio de quien diseña o ejecuta la solución.

## BIBLIOGRAFÍA

1. **Ley N° 19.300.** (1994). *Ley sobre Bases Generales del Medio Ambiente*. Diario Oficial de la República de Chile.
2. **Michalak,** (2020). (*Referencia incompleta en el informe: falta título del artículo*). *Journal of Mechanical and Energy Engineering*, 4(2), 179–188.
3. **Clarke,** (2001). (*Referencia incompleta en el informe: solo se menciona en el texto; falta título, editorial/revista, etc.*).
4. **International Organization for Standardization (ISO).** *ISO 52016-1*. (*Edición/año no indicado en el informe; se menciona como norma internacional*).
5. **International Organization for Standardization (ISO).** *ISO 10456*. (*Edición/año no indicado en el informe; se menciona para propiedades térmicas*).
6. **International Organization for Standardization (ISO).** *ISO 7726*. (*Edición/año no indicado en el informe; se usa para criterios/condiciones de medición*).
7. **ASHRAE.** *ASHRAE Standard 55*. (*Edición/año no indicado en el informe; se menciona junto a ISO 7726*).
8. **VDI (Verein Deutscher Ingenieure).** *VDI 6007*. (*Edición/año no indicado en el informe; se menciona como referencia internacional*).

## LINKOGRAFÍA

1. **Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU).** (2024). *Nueva Reglamentación Térmica (RT 3.0). Art. 4.1.10 OGUC*. Recuperado de: <https://www.minvu.gob.cl/nueva-reglamentacion-termica>

2. **Ministerio del Medio Ambiente (MMA).** (2023). *Planes de Descontaminación Atmosférica*. Recuperado de: <https://mma.gob.cl/planes-de-descontaminacion>