

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**  
**VALPARAÍSO – CHILE**



**“ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL  
POTENCIAL DE REFRIGERACIÓN POR  
RADIACIÓN NOCTURNA DE UNA PLACA  
PLANA BAJO DIFERENTES CONDICIONES  
DE OPERACIÓN”**

**JORGE IGNACIO BARRIOS ARTECHE**

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:  
INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

**PROFESOR GUÍA: Dr. Ing. RODRIGO BARRAZA VICENCIO**

**PROFESOR CORREFERENTE: Dr. Ing. JORGE CONTRERAS RODRÍGUEZ**

**MARZO – 2018**

## **Resumen**

El panorama energético actual requiere un extremo cuidado en el uso de los recursos naturales. Es responsabilidad de los profesionales garantizar una generación de energía limpia y eficiente. Bajo este escenario, las energías renovables se posicionan como una alternativa viable para suplir la demanda energética que exigen los distintos procesos a lo largo del país.

La propuesta de valor del presente trabajo comprende el estudio de sistemas de refrigeración pasivos como un tipo de producción de energía de enfriamiento renovable, método poco aplicado en el país. Se estudia la tecnología existente y distintas aplicaciones experimentales observadas en diversas partes del mundo. Existe un análisis de las variables constructivas y ambientales que afectan al proceso de enfriamiento, determinando en qué medida influyen dentro del mismo proceso. Luego de la optimización de dichas variables se construyen prototipos para realizar mediciones en diferentes zonas del país y bajo distintas condiciones operacionales. Se incluye el proceso constructivo y el procedimiento de medición empleado.

Los resultados de las campañas de mediciones se presentan alentadores, emulando los obtenidos en pruebas experimentales en otras localizaciones a lo largo del mundo.

Se incluyen preguntas abiertas al lector que buscan generar debate y propuestas sobre aristas de investigación acerca del enfriamiento pasivo y variantes de aplicaciones.

## **Abstract**

The current energy scenario requires extreme care in the use of natural resources. It is the responsibility of the professionals to guarantee a generation of clean and efficient energy. Under this scenario, renewable energies are positioned as a viable alternative to meet the energy demand demanded by the different processes throughout the country.

The present value proposal includes the study of passive refrigeration systems as a type of production of renewable cooling energy, a method little applied in the country. The existing technology and different experimental applications observed in different parts of the world are studied. There is an analysis of the constructive and environmental variables that affect the cooling process, determining to what extent they influence within the same process. After the optimization of these variables, prototypes are built to perform measurements in different areas of the country and under different operational conditions. The constructive process and the measurement procedure used are included.

The results of the measurement campaigns are encouraging, emulating those obtained in experimental tests in other locations throughout the world.

It includes questions open to the reader that seek to generate debate and proposals on research edges about passive cooling and variants of applications.

## Glosario

**Energías renovables:** energía proveniente de fuentes naturales e inagotables dentro de la escala de vida humana (ejemplos: solar, eólica).

**Combustibles fósiles:** productos empleados como combustible de acuerdo a sus características químicas (ejemplo: carbón, petróleo, gas natural). Su combustión es la principal causante de la contaminación atmosférica y sus consecuencias.

**Matriz energética:** cuantificación de la energía disponible de un país, de acuerdo a la fuente proveniente de cada una.

**Impacto medioambiental:** alteración producida por el hombre sobre el medioambiente.

**Enfriamiento pasivo:** intercambio energético por radiación entre una superficie y el cielo.

**Sistema HVAC:** de acuerdo a sus siglas en inglés (*Heating, Ventilating and Air Conditioning*) corresponde a un sistema de calefacción, ventilación y aire acondicionado.

**Radiador:** en este trabajo se emplea como una placa metálica que intercambia calor mediante radiación, por lo cual será afectada a cambios de temperatura de manera natural.

**Ventana de cielo:** intervalo de longitudes de ondas comprendido entre 8 y 13  $\mu\text{m}$ .

**Radiación:** emisión de energía entre cuerpos mediante ondas electromagnéticas.

**Convección:** método de transferencia de calor generada por medio de un fluido que transporta calor entre cuerpos a diferentes temperaturas.

**Conducción:** tipo de transferencia de calor propagada a través de un medio sólido.

**Pantalla de viento:** superficie de polietileno que permite aislar al radiador de cargas eólicas.

**Prototipo modular:** diseño a menor escala de un equipo original, cuyas características de modularidad le permiten un fácil transporte e instalación en diferentes zonas.

**Emisividad de un material:** porcentaje del total de energía en forma de radiación que es capaz de transmitir el material.

**Transparencia de un material:** propiedad óptica del material, indica el porcentaje de energía incidente que logra atravesarlo.

## Índice

1.	Estudios experimentales con resultados interesantes .....	1
1.1.	Chile .....	1
1.2.	Internacionales .....	2
1.3.	Resumen y apreciaciones .....	5
2.	Diseño de experimento.....	6
2.1.	Modelo numérico .....	6
2.2.	Aplicación del modelo .....	7
2.2.1.	Análisis de sensibilidad y optimización.....	7
2.2.1.1.	Estudio de parámetros independientes .....	8
2.2.1.2.	Estudio de variables conjuntas .....	12
2.2.2.	Análisis de condiciones climáticas.....	15
2.2.3.	Resumen.....	17
3.	Construcción del radiador nocturno.....	18
3.1.	Primer prototipo .....	18
3.1.1.	Proceso constructivo .....	18
3.1.2.	Procedimiento de medición.....	20
3.1.2.1.	Procedimiento de calibración.....	21
3.1.3.	Error de medición y propagación.....	22
3.1.4.	Mediciones y análisis .....	24
3.2.	Prototipos modulares .....	28
3.2.1.	Proceso constructivo .....	28
3.2.2.	Procedimiento de medición.....	29
3.2.3.	Verificaciones previas.....	29
3.2.4.	Zonas de medición .....	32
3.2.4.1.	LER UTFSM – Viña del Mar.....	32
3.2.4.2.	Campus San Joaquín (CSJ) UTFSM – Santiago.....	33
3.2.4.3.	Copiapó.....	33
3.2.4.4.	Resumen variables a registrar .....	34
3.2.5.	LER UTFSM: Mediciones y análisis .....	35
3.2.5.1.	Temperatura .....	35
3.2.5.2.	Flujo de calor .....	36
3.2.5.3.	Resumen.....	40

3.2.6.	CSJ UTFSM: Mediciones y análisis .....	41
3.2.6.1.	Temperatura .....	42
3.2.6.2.	Flujo de calor .....	43
3.2.6.3.	Resumen.....	44
3.2.7.	NORTE: Mediciones y análisis.....	45
3.2.7.1.	Temperatura .....	45
3.2.7.2.	Flujo de calor .....	47
3.2.7.3.	Resumen.....	47
3.2.8.	Mediciones específicas .....	48
3.2.8.1.	Análisis de velocidad de viento.....	48
3.2.8.2.	Análisis de sombreado .....	52
4.	Conclusiones .....	54
5.	Perspectivas y mejoras operacionales .....	56
6.	Referencias.....	57

## Introducción

El fenómeno del calentamiento global en complemento al agotamiento de las fuentes de combustibles fósiles, a nivel mundial ha desatado una alerta medioambiental que persigue el uso eficiente de los recursos naturales para la generación de energía.

Actualmente, en Chile se encuentra en desarrollo el Plan de Política Energética 2050 [1]. Uno de sus pilares principales de interés es la producción de energía compatible con el medio ambiente, para lo que el Ministerio de Energía propone los siguientes desafíos: una matriz energética renovable y el desarrollo de estrategias para abordar impactos medioambientales. Considerando el potencial que poseen zonas puntuales del país para desarrollar proyectos relacionados con energías renovables, para ese año se espera que la matriz energética esté compuesta al menos de un 70% de energía proveniente de fuentes renovables (contrastar con figura 1). Además, se busca la reducción de un 30% en intensidad de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) respecto al año 2007 (figura 2), donde sería un gran aporte la reducción de combustibles fósiles como fuente de energía.

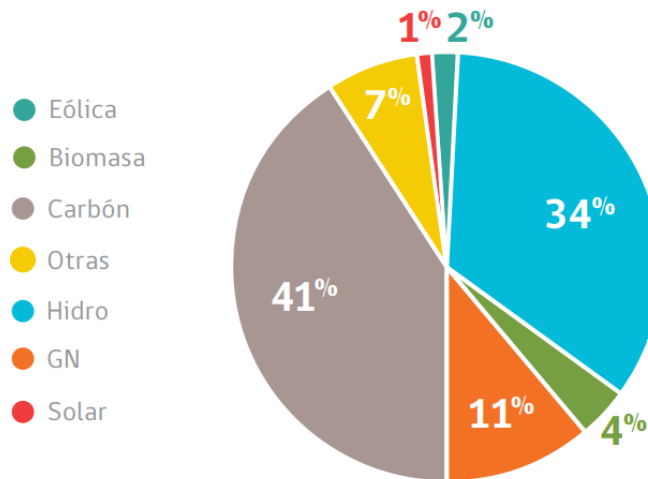


Figura 1: Generación eléctrica en Chile (2014).

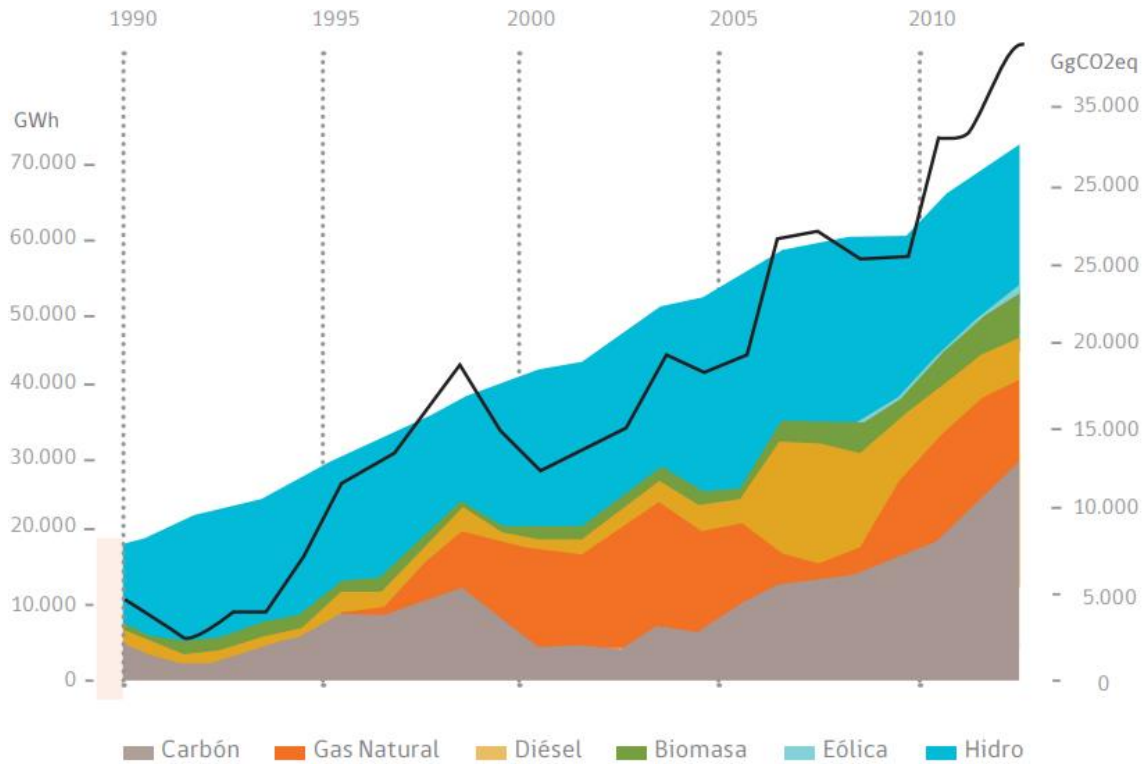


Figura 2: Generación eléctrica por tipo de fuente y emisiones de GEI, 1990–2013.

Por otro lado, estudios han demostrado que cerca de 30% de la energía producida a nivel mundial es consumida por el sector urbano y que en muchas regiones del mundo la demanda de sistemas HVAC (calentamiento, ventilación y aire acondicionado) puede representar hasta el 40% de la energía consumida por un edificio [2]. Luego, como el confort térmico del cuerpo humano está asociado a un rango estable de temperaturas, los edificios se calientan en invierno y se enfrían en verano. Puesto que, comúnmente una unidad de energía de refrigeración requiere mayor consumo de energía primaria en contraste a una unidad de energía de calefacción, se torna aún más importante el manejo prudente de energía para aplicaciones de enfriamiento.

Estas razones posicionan a sistemas de enfriamiento pasivo como una alternativa ventajosa en términos de eficiencia energética en sectores residenciales. Sin embargo, en Chile se desconoce su verdadero potencial. He aquí el propósito del presente trabajo.

### Enfriamiento pasivo

Este método consiste en disipar la mayor cantidad de energía posible desde una superficie (denominada radiador nocturno) mediante radiación hacia el cielo –que posee una temperatura bastante inferior a la ambiental– en el rango de longitudes de ondas infrarrojo comprendido en el espectro entre 8 a 13  $\mu\text{m}$ , intervalo conocido como ventana de cielo, para así, ejercer un enfriamiento en la placa logrando temperaturas menores a la ambiente. Sin embargo, este proceso de enfriamiento radiativo es perjudicado por factores ambientales como la humedad relativa, radiación solar, nubosidad y contaminación ambiental, además de cargas de convección generadas por la presencia de viento, que resultan negativas desde la perspectiva que el radiador se encuentra a una temperatura inferior a la ambiental, por lo que son precisas de disminuir al máximo a fin de optimizar el proceso deseado. Ver figura 3.

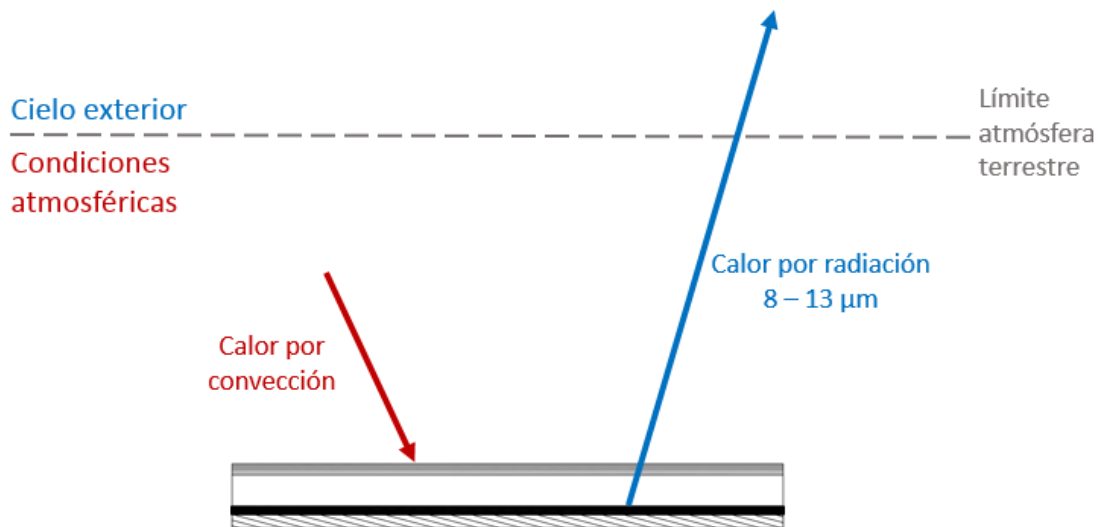


Figura 3: Componentes de calor que afectan al proceso de enfriamiento pasivo.

Gran parte de los radiadores nocturnos corresponden a colectores solares de placa plana, modificados y adaptados para el enfriamiento, removiendo su cubierta de vidrio, que eventualmente reflejaría gran parte de la radiación incidente desde el radiador, devolviéndola hacia éste e impidiendo el proceso de enfriamiento. En lugar de vidrio es posible utilizar una cubierta de polietileno, transparente dentro de la ventana de cielo, lo que resulta óptimo para

permitir el intercambio radiativo entre el radiador y el cielo. Además, la placa de polietileno impide que el viento impacte de forma directa al radiador, disminuyendo las cargas convectivas sobre éste. Por esta razón, la placa de polietileno es llamada pantalla de viento. No obstante, si la pantalla de viento no es transparente en su totalidad será susceptible a formar una situación análoga al conocido efecto invernadero entre la placa radiadora y la pantalla, situación que incluso siendo leve reduciría el potencial de enfriamiento del radiador (tal como sucedería con el vidrio).

Luego, estudios detallados podrían concluir bajo qué condiciones ambientales u operacionales resultaría óptima la instalación de una pantalla de viento frente a un radiador expuesto completamente al ambiente, es decir, sin placa de polietileno.

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Construcción de un equipo que permita determinar experimentalmente el potencial de refrigeración y que sea posible su instalación en distintas regiones de Chile.

### **Objetivos específicos**

- Analizar el estado del arte relacionado a la tecnología de enfriamiento por radiación.
- Diseñar el aparato experimental por medio de un modelo teórico que permita asegurar una medición precisa a través de características constructivas de equipo radiador y selección de instrumentos adecuados.
- Construcción de prototipo modular que actúe como radiador.
- Diseñar un protocolo de medición.
- Medir el potencial de radiación nocturna en 3 zonas geográficas.
- Evaluar la pertinencia de la información experimental para su uso en validaciones numéricas.

# 1. Estudios experimentales con resultados interesantes

## 1.1. Chile

El único experimento en el país cuyos resultados han sido publicados data del año 1972 y fue realizado por el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile [4]. Se estudió el intercambio energético entre una superficie que simulaba un cuerpo negro, ubicada en el desierto de Atacama, con el cielo y el ambiente. El principal objetivo de esta campaña de mediciones consistió en obtener la máxima diferencia de temperaturas entre el ambiente y el radiador poniendo énfasis en la influencia de los factores constructivos en los resultados obtenidos y buscando desarrollar una metodología experimental para dicho ensayo.

Los mejores resultados fueron obtenidos durante las horas crepusculares, donde existen los primeros o últimos instantes de radiación directa solar, que si bien influyen negativamente en el efecto deseado, coinciden con el menor porcentaje de humedad relativa existente a lo largo del intervalo de enfriamiento de la placa, efecto positivo para el fenómeno en estudio. Por consiguiente, se instaló un biombo que protegiera al radiador, ocultándolo de los rayos solares a fin de disminuir la radiación incidente sobre el equipo de prueba. Esta condición aumentó considerablemente el registro de diferencia máxima de temperatura en el radiador respecto al ambiente de 28 °C a 40,3 °C, valor jamás alcanzado mediante este procedimiento en algún otro sitio. Los valores de diferencias entre temperatura ambiental y de placa empleada como radiador de 25 °C a 30 °C promedio obtenidos durante las noches de prueba demuestran el potencial que tendría el experimento adaptado a aplicaciones prácticas de enfriamiento.

Luego, resulta adecuado un estudio que contemple la optimización de variables constructivas del equipo, así como establecer la incidencia de aquellos parámetros climáticos y ambientales que actúan de forma natural sobre el mismo, con el fin de sondear regiones del país donde el radiador debiese manifestarse de forma más eficiente y se puedan generar futuras aplicaciones.

## 1.2. Internacionales

A continuación se exponen estudios recientes que presentan distintos enfoques sobre el enfriamiento por radiación, con la respectiva discusión propuesta por el autor del presente informe.

- I. El año 2012 en Toronto, Canadá, se realizó una prueba de enfriamiento por radiación nocturna cuyo objetivo fue examinar el enfriamiento de una placa metálica perforada orientada hacia el cielo [5]. También se verificó si un colector solar posee la capacidad de enfriar aire por debajo de la temperatura ambiente.

El enfriamiento logrado en la placa metálica tuvo un comportamiento estable que oscilaba en torno a los 10 °C bajo el ambiente. El fenómeno observado tenía efecto entre la puesta de sol de un día y salida del mismo al día siguiente. Por otro lado, las pruebas confirmaron que el intercambio radiativo nocturno fue capaz de enfriar el aire para su uso en un edificio hasta en 4,7 °C bajo la temperatura ambiente utilizando un colector solar transpirado (sin placa de vidrio) orientado hacia el cielo. Además, se evidenció una disminución de la diferencia de temperaturas posterior a la media noche, situación reiterada durante los días en que se registraron mediciones. Sin embargo, el estudio no logra responder la siguiente interrogante, planteándola como ejercicio de discusión hacia los lectores: ¿qué causó que la temperatura del colector solar se acercara a la ambiental desde la media noche en adelante?

**Discusión:** ¿Será posible replicar en distintas zonas de Chile los resultados obtenidos para el enfriamiento de una placa metálica? ¿Qué potencial presentarán las variadas regiones geográficas existentes en nuestro país?

- II. La revista “Nature communications” publicó un estudio experimental realizado en Standford, California, donde presenta un equipo que exhibe enfriamiento pasivo continuo durante el día y la noche [6].

Como radiador utilizan un emisor selectivo (material no especificado) que posee alta emisividad dentro de la ventana de cielo y baja fuera de ella. Lo anterior es positivo

para desacoplar térmicamente al radiador del aire ambiente y la radiación solar a fin de minimizar el calentamiento en el equipo. Además, le permite interactuar sin interferencias con el espacio exterior a través de la ventana de cielo. Durante el experimento instalan el emisor dentro de una cámara de vacío (para reducir cargas conductivas y convectivas) equipada con una ventana de ZnSe (seleniuro de zinc) que posee alta transmitancia a la ventana de cielo, asegurando un eficiente intercambio entre el emisor y el espacio. Luego, la radiación solar directa e indirecta es minimizada mediante una pantalla que sombrea al equipo, además de un espejo cónico que rodea la ventana de ZnSe asegurando que el radiador solo esté expuesto a radiación solar difusa en el horario diurno.

Los resultados demuestran que la tendencia entre temperatura ambiente y de emisor es equitativa a lo largo del día. La diferencia promedio de temperaturas entre ambos en 24 horas es de 37,4 °C con una reducción máxima de 42,2 °C de diferencia manifestándose en el instante del día que presenta mayor radiación solar. Este comportamiento contra intuitivo representa la efectividad de las propiedades de los materiales implicados y del sistema para atacar la radiación solar directa e indirecta. También, esta brecha máxima tiene estrecha relación con coincidir en el instante del día que presentó menor humedad relativa contenida en el ambiente.

A pesar de los resultados, los autores indican que los materiales empleados en este experimento son demasiado costosos, lo que restringe su uso y genera una desventaja para producir aplicaciones de gran escala tan potentes como la descrita.

**Discusión:** Luego de los alentadores resultados exhibidos recientemente surgen los siguientes planteamientos: ¿Debemos conformarnos con desarrollar aplicaciones de baja potencia enfocadas en el sector urbano/residencial para estimular la eficiencia energética y el uso competente de los recursos naturales? ¿Será rentable la inversión en sistemas de alta eficiencia por parte de industrias específicas (criogénica, por ejemplo) para reducir el elevado consumo eléctrico en sus procesos de refrigeración?

- III. En un ensayo efectuado en Hefei, China [7], los autores proponen una superficie de selectividad espectral útil para el calentamiento solar durante el día y el enfriamiento radiativo por la noche.

Realizan pruebas ópticas a distintos materiales concluyendo que una buena superficie selectiva sería una placa de titanio recubierta con una película fina de tereftalato de polietileno (TPET). La superficie TPET posee emisividades aproximadas de 0,92 en la banda de radiación solar (0,2 – 3  $\mu\text{m}$ ), 0,8 en el espectro de la ventana atmosférica (8 – 13  $\mu\text{m}$ ) y 0,55 fuera de los rangos de longitudes de ondas mencionados, lo que le permite disminuir en buena medida la pérdida de calor radiante durante el día y la pérdida de enfriamiento radiante durante la noche.

Las pruebas experimentales indican que el enfriamiento radiativo se produce mejor con cielo claro y un ángulo de inclinación del equipo de  $0^\circ$  respecto a la horizontal. Se alcanzaron temperaturas de hasta  $13^\circ\text{C}$  bajo la ambiental, con potencias máximas de enfriamiento de  $36,1\text{ W/m}^2$ . Durante el día, con temperaturas superiores a  $30^\circ\text{C}$ , los resultados señalan que la superficie logró alcanzar una temperatura máxima de  $109,7^\circ\text{C}$ , produciendo una potencia de calentamiento máxima de  $925\text{ W/m}^2$ .

Luego, contrastes entre superficies exclusivas para calentamiento y enfriamiento con la superficie TPET apuntan que la eficiencia de calentamiento de la última es inferior respecto a una convencional. De todas formas, la superficie TPET demuestra una eficiencia de calentamiento considerable. Respecto al enfriamiento, no se exhibe una gran diferencia frente al sistema convencional de refrigeración. No obstante, continúa siendo más eficiente este último. Finalmente, la superficie de TPET muestra un positivo potencial para uso práctico en la industria ya que su método de procesamiento y costos son sencillos y baratos.

**Discusión:** ¿Es conveniente una instalación cuya implicancia sea sacrificar eficiencia de calentamiento y enfriamiento con el objetivo de incluir ambos fenómenos en un solo equipo? Un adecuado estudio podría definir los intervalos temporales en que una opción sería más rentable frente a otra. Luego, investigaciones más detalladas podrían dar paso a descubrimientos de superficies más eficientes para llevar a cabo los dos procesos, minimizando el intercambio radiativo fuera de los rangos de longitudes de ondas de interés.

### 1.3. Resumen y apreciaciones

Los estudios analizados coinciden en que el enfriamiento pasivo se lleva a cabo de forma más eficiente cuando los equipos están inmersos en ambientes con cielo claro y humedad relativa baja. Los instantes de mayor enfriamiento respecto al ambiente se produjeron alrededor de la hora crepuscular de la tarde pues coincidía con ser el momento de menor humedad relativa dentro del intervalo temporal en que el equipo no recibía radiación solar directa. A raíz de lo anterior, una condición de operación que resultó óptima para la reducción de temperatura en la placa fue producir sombreamiento sobre el radiador, evitando la incidencia de radiación solar directa sobre el último y aprovechando los instantes de baja humedad relativa para aumentar la diferencia máxima de temperaturas entre radiador y ambiente. En la tabla 1.1 se presenta un resumen de las condiciones logradas en cada experimento.

Tabla 1.1: Resumen estudios experimentales

Localidad	Propuesta/Objetivo	Resultados/Observaciones
Desierto de Atacama, Chile	Estudiar condiciones de enfriamiento radiativo entre superficie plana y cielo nocturno.	-Mejores resultados obtenidos en horas crepusculares. Promedio de 25 °C bajo el ambiente. -Máxima de 28 °C, aumentada a 40 °C bajo método de sombreamiento en hora crepuscular.
Toronto, Canadá	1) Enfriamiento de una placa expuesta al cielo. 2) Enfriamiento de aire con colector solar.	1) Comportamiento estable en torno a 10 °C bajo temperatura ambiente. 2) Enfriamiento de aire de hasta 4,7 °C bajo temperatura ambiente.
California, Estados Unidos	Enfriamiento pasivo continuo durante día y noche.	-Temperaturas promedio de 37 °C bajo el ambiente, con una máxima de 42 °C. -Materiales muy costosos.
Hefei, China	Superficie selectiva útil para calentamiento solar diurno y enfriamiento pasivo nocturno.	-Enfriamiento de hasta 13 °C bajo el ambiente, con potencias de enfriamiento de 36 W/m <sup>2</sup> . -Sacrificio de potencias máximas de calentamiento/enfriamiento respecto a equipos especializados en una función.

A lo largo del presente buscaremos emular los comportamientos señalados en los distintos experimentos. Analizaremos la incidencia de las distintas condiciones de operación sobre la reducción de temperatura en el radiador y optimizaremos el proceso constructivo del mismo para obtener los mejores resultados posibles, compararlos con aquellos de estudios existentes y extraer conclusiones al respecto.

## **2. Diseño de experimento**

Previa construcción del equipo radiador se ha estudiado su comportamiento térmico mediante un modelo numérico computacional usando el software Engineering Equation Solver. El modelo busca simular el comportamiento del equipo de enfriamiento resolviendo el balance de energía presente entre éste y su entorno de modo de poder predecir como interactúa el equipo bajo diversas condiciones climáticas.

### **2.1. Modelo numérico**

La placa que actúa como radiador nocturno interactúa por radiación con el cielo en el rango de longitudes de ondas conocido como ventana de cielo y mediante convección con el ambiente, como se señaló mediante la figura 3. Los detalles constructivos sobre el balance de energía y la librería de ecuaciones utilizadas en el problema simulado, así como los coeficientes de transferencia de calor y criterios aplicados se pueden encontrar en la memoria desarrollada que aparece descrita en la referencia [8].

Luego, la simulación teórica presenta la siguiente estructura descriptiva (figura 2.1), que refleja los parámetros de entrada y de salida que la caracterizan.

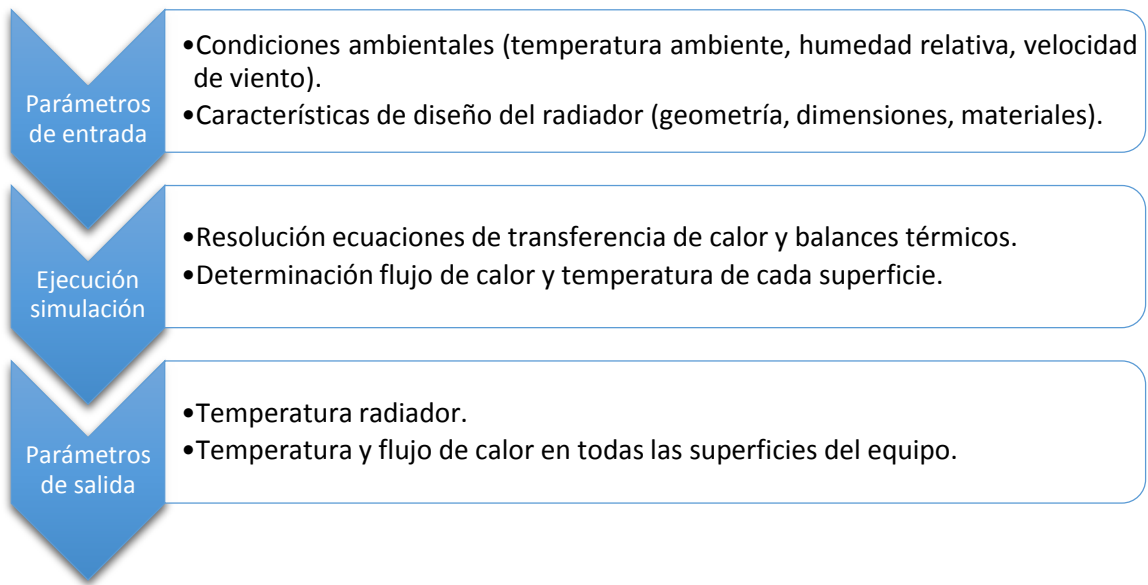


Figura 2.1: Estructura resumen de modelo numérico.

## 2.2. Aplicación del modelo

### 2.2.1. Análisis de sensibilidad y optimización

El modelo se utiliza para estudiar la sensibilidad y optimización de las variables constructivas que dependen del usuario. Ver figura 2.2. Corresponden a las aristas de la placa que será utilizada como radiador (a), la altura de separación entre el radiador y la pantalla de viento (b), y las emisividades de radiador y paredes internas del equipo.

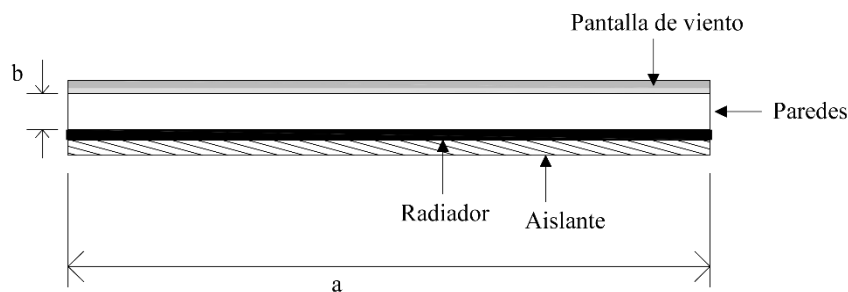


Figura 2.2: Diagrama de componentes de radiador nocturno.

El objetivo es determinar qué factores son más predominantes en el resultado final del experimento (temperatura del radiador) y en qué medida influyen, de modo de enfocar en ellos los mejores recursos (dinero, instrumentos de medición con mayor precisión, etc.) al momento de la construcción y durante las campañas de mediciones.

### 2.2.1.1. Estudio de parámetros independientes

Se estudia el comportamiento del radiador bajo ciertas condiciones ambientales definidas de modo arbitrario y de comportamiento constante a lo largo de las distintas simulaciones. Dichos parámetros y sus respectivos valores son:

- Temperatura ambiental: isotermas 5, 10 y 15 °C
- Humedad relativa: 50%
- Velocidad de viento: 5 m/s

Para efectos de practicidad y modularidad nos limitamos a analizar una placa cuadrada que comprende un rango de dimensiones entre 0,1 m a 2 m de largo. La figura 2.3 detalla el comportamiento de la temperatura en el radiador para placas de diferentes dimensiones. Análogamente, la figura 2.4 representa la misma variación de temperaturas para las correspondientes áreas que implican las dimensiones establecidas.

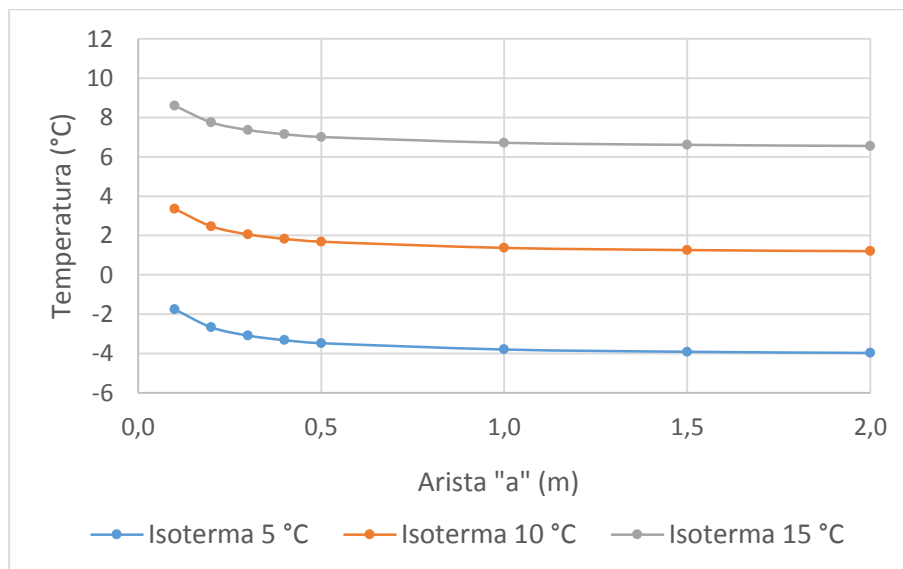


Figura 2.3: Temperatura de radiador en función de sus dimensiones.

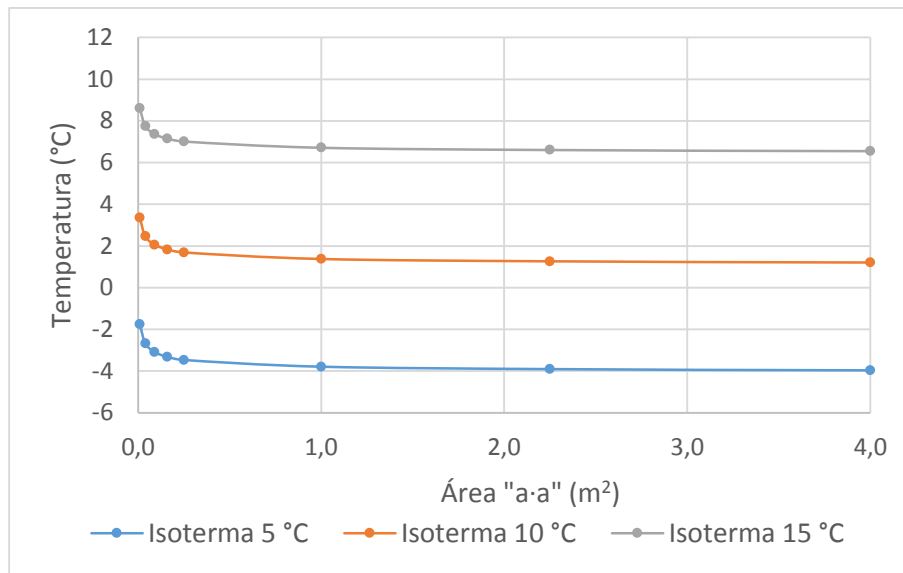


Figura 2.4: Temperatura de radiador en función de su área.

Se desprende de los gráficos anteriores que el crecimiento en el área del radiador implica un mayor enfriamiento del mismo, alcanzando así, menores temperaturas respecto a la temperatura ambiental. No obstante, se debe tener precaución en el valor asintótico que adquiere la temperatura mínima de la placa a medida que comienzan a crecer las dimensiones de la misma, por lo que el valor óptimo se debe calcular en función de parámetros adicionales (económicos, lugar de instalación y modularidad según aplicación). Además, el abrupto cambio de pendiente observado cuando la placa es más diminuta tiene relación con el aumento del factor de visión o forma que va adquiriendo la última hacia el cielo. Después de ciertas dimensiones éste va tendiendo a un valor prácticamente fijo cuyo cambio es marginal.

Respecto a la altura de separación entre el radiador y la pantalla de viento, el rango de estudio empleado va desde 0,01 m hasta 1,5 m. Se espera, bajo el mismo criterio de factores de forma explicado recientemente, que mientras menor sea la altura de las paredes laterales mayor sea el enfriamiento de la placa. Los resultados simulados se detallan en la figura 2.5.

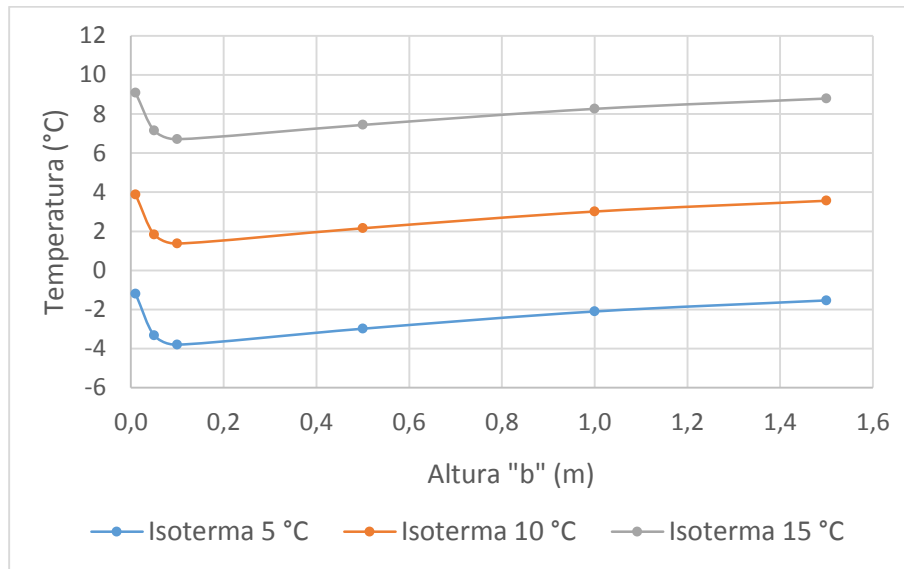


Figura 2.5: Temperatura de radiador en función de la altura de paredes laterales.

Tal como se esperaba, a medida que el tamaño de las paredes laterales del equipo aumentan su dimensión, interfieren de mayor forma en el intercambio radiativo de la placa con el cielo, lo que se ve reflejado en la menor temperatura de enfriamiento alcanzada por el radiador respecto al ambiente. Sin embargo, se observa que el valor óptimo para este parámetro no tiende completamente a 0. Por tanto, es necesario que exista una leve separación entre la pantalla de viento y el radiador, dejando así, la placa aislada térmicamente del ambiente por una fina capa de aire.

Por último, las emisividades de placa y paredes comprenden el espectro entre 0,1 y 1 (cuerpo negro).

Los resultados obtenidos de la simulación para la emisividad de la placa que actúa como radiador se pueden observar en la figura 2.6.

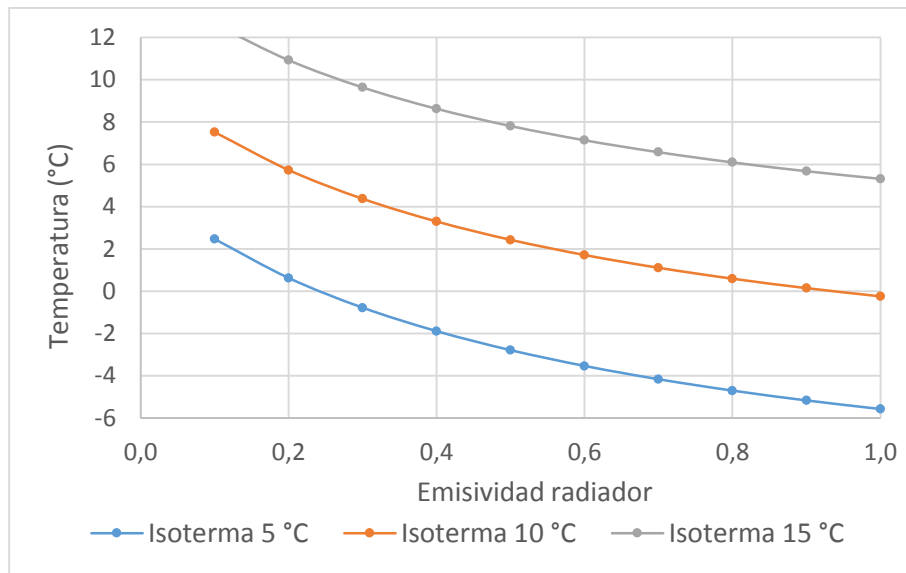


Figura 2.6: Temperatura de radiador en función de su emisividad.

Destacar la importancia que adquiere la emisividad del radiador en la máxima reducción de su temperatura, donde el cuerpo negro sería el caso ideal para el enfriamiento máximo, lo cual resulta lógico pues de dicha forma el radiador puede liberar la totalidad de su exceso de calor hacia el cielo nocturno. No obstante, resulta admisible trabajar con cuerpos grises que presenten como límite inferior una emisividad cercana a 0,9 o superior.

Por su parte, mediante la figura 2.7 la simulación indica que la emisividad de las paredes que separan la placa de la pantalla de viento debe ser la menor posible. Sin embargo, la ínfima variación en el resultado final para distintos valores de emisividad nos entrega indicios de la baja sensibilidad que posee la temperatura del radiador respecto a esta variable.

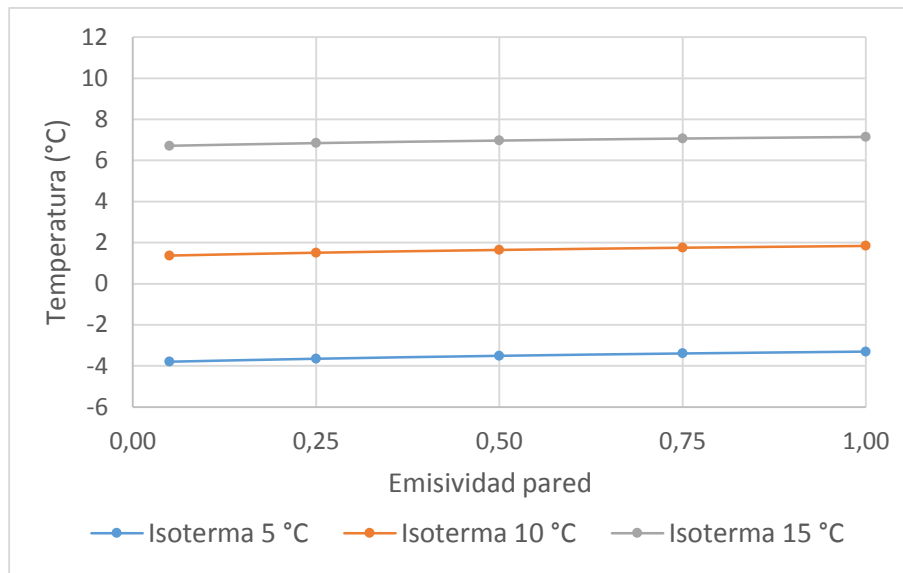


Figura 2.7: Temperatura de radiador en función de emisividad de paredes laterales del equipo.

Finalmente, se infiere de todos los gráficos presentados hasta el momento, que independiente de la temperatura ambiental, el comportamiento y tendencia de la temperatura en el radiador para distintas dimensiones y emisividades a condiciones climáticas constantes es similar.

Luego, para lograr una maximización óptima en el enfriamiento del radiador es importante un estudio en detalle que relacione todos los parámetros recientemente analizados. Así, se logrará evidenciar el real impacto que produce cada uno en el resultado final de nuestro radiador y se podrá decidir cómo proceder con la construcción del equipo.

### 2.2.1.2. Estudio de variables conjuntas

Se efectúan simulaciones para 5 casos que combinan distintos valores de los parámetros antes analizados. A medida que avanzamos en cada caso se va optimizando una o dos variables a la vez en función de las conclusiones del análisis de variables aisladas, todo con el fin de obtener una menor temperatura de equilibrio térmico en el radiador. Luego se vuelve a analizar la sensibilidad del sistema frente a los distintos valores que adoptan los parámetros respectivos. Observar detalles en figuras 2.8 a 2.12.

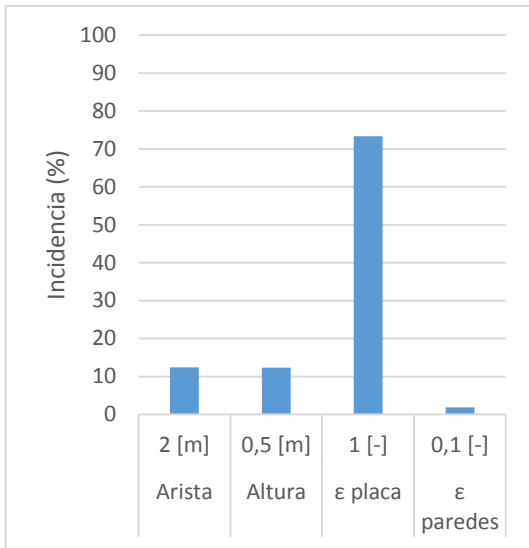


Figura 2.8: Caso inicial.

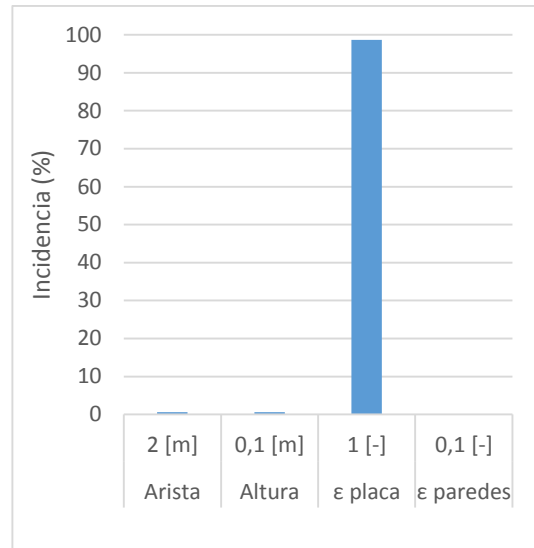


Figura 2.9: Optimización altura.

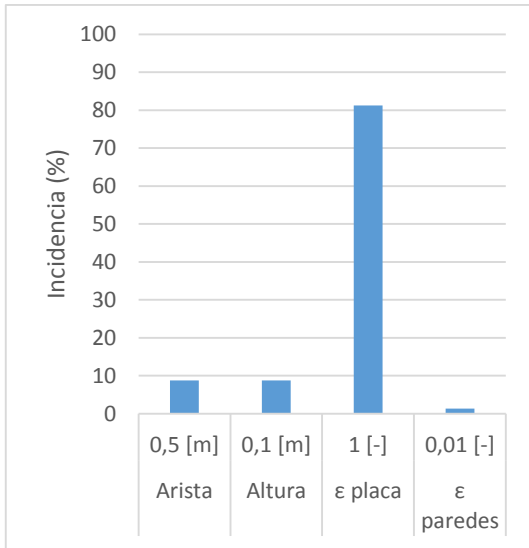


Figura 2.10: Reducción arista y  $\epsilon$  paredes.

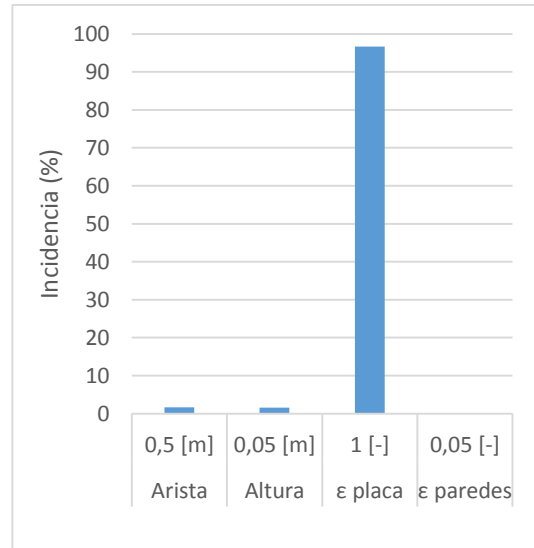


Figura 2.11: Reducción altura y aumento  $\epsilon$  paredes.

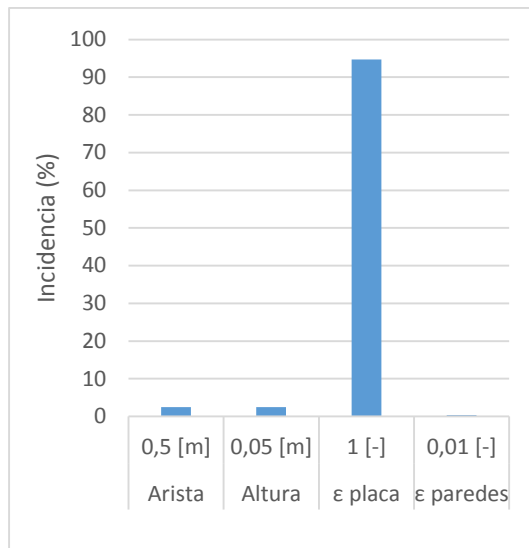


Figura 2.12: Reducción  $\epsilon$  paredes.

Se concluye en base a las temperaturas obtenidas, mostradas en la figura 2.13, y reafirmando el análisis de variables por separado, que el escenario óptimo comprende la mayor distancia para la arista del radiador y la menor separación entre el mismo y la pantalla de viento. Luego, la optimización indica que las paredes internas deben poseer la menor emisividad posible. Por su parte, el radiador debe ser lo más cercano a un cuerpo negro para almacenar el menor calor posible y poder liberarlo en mayor medida hacia el cielo nocturno. Coincidentemente, cuando se genera el caso óptimo prácticamente la totalidad del resultado final es sensible a una sola variable, en este caso a la emisividad del radiador (volver a figura 2.6), que como vimos en el análisis de variables aisladas es aquel parámetro cuya variación genera mayor incidencia en el comportamiento de la temperatura del radiador.

De todas maneras, para el rango de análisis de los parámetros involucrados la variación en el resultado final es mínima, por lo que al momento de la construcción se optimizará lo mejor posible la emisividad de la placa y se evaluará la factibilidad de mejorar en su máxima medida el resto de las variables en función de los recursos disponibles.

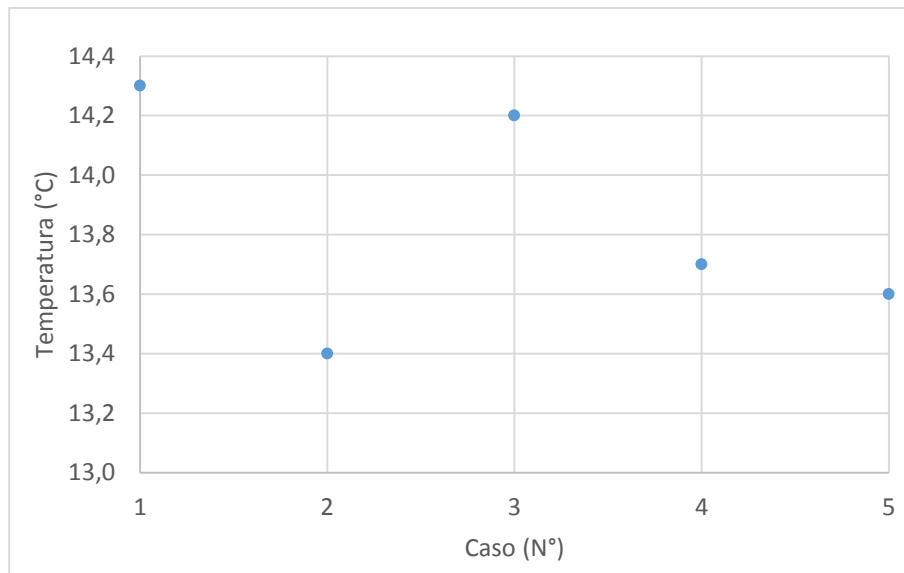


Figura 2.13: Temperatura de radiador para los casos analizados.

### 2.2.2. Análisis de condiciones climáticas

Si bien, hay factores ambientales que no se pueden predecir con exactitud a lo largo del tiempo, se ha realizado una comparación entre posibles resultados en la temperatura del radiador en función de aquellas condiciones climáticas. El fin de esta verificación es determinar bajo qué clima el radiador tendría un comportamiento más eficiente, lo que a su vez entregaría indicios de zonas geográficas con mayor potencial de enfriamiento en el país.

Cada análisis se realizará para tres casos de temperatura ambiental diferentes (análogo a los efectuados en la sección anterior) donde se varía solo una condición climática a la vez. Además, habrá una serie de factores preestablecidos de manera aleatoria que permanecerán constantes, a excepción de aquel que corresponda analizar. Los valores para el momento en que éstos permanezcan fijos serán los siguientes:

- Temperatura ambiental: isothermas 5, 10 y 15 °C
- Humedad relativa: 50%
- Velocidad de viento: 5 m/s
- Emisividad del radiador: 0,9

Luego, los resultados sobre la temperatura del radiador para la variación de humedad relativa y velocidad de viento son exhibidos en las figuras 2.14 y 2.15 respectivamente.

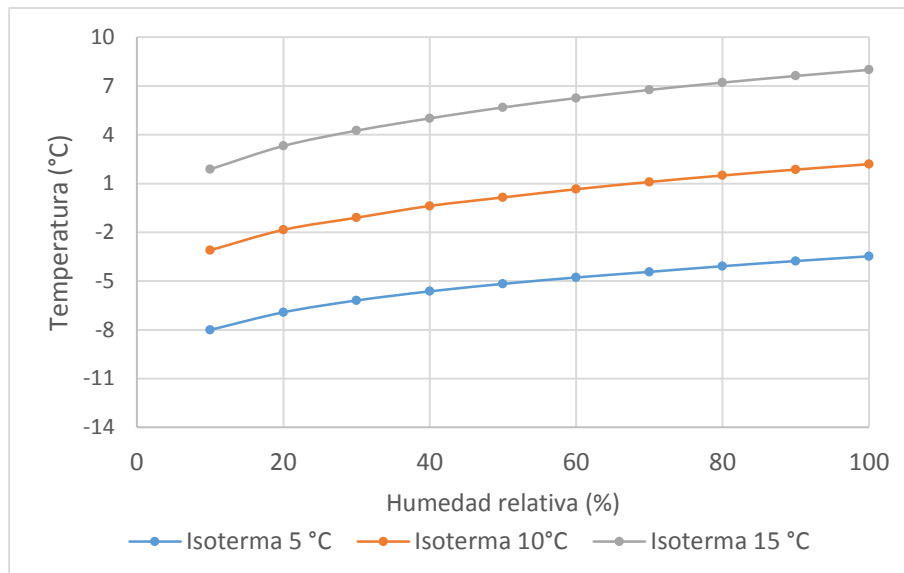


Figura 2.14: Temperatura de radiador en función de la humedad relativa.

De la figura 2.14 se observa que entre un clima prácticamente seco y uno saturado se obtiene una diferencia de alrededor de 6 °C en el radiador, considerando uno de emisividad 0,9 y sometido a cargas eólicas permanentes de 5 m/s. Se destaca que en climas con menor porcentaje de humedad relativa el radiador alcanzará temperaturas menores, por lo que su potencial de enfriamiento será mayor. Ello tiene relación con la interferencia que produce el agua contenida en el ambiente para el intercambio radiativo entre la placa y el cielo nocturno.

Un estudio detallado sobre las condiciones climáticas en Chile [9] demuestra que la humedad relativa tiene la característica de ir en ascenso de norte a sur, obteniendo el menor valor de agua contenida en el ambiente en los alrededores de la ciudad de Antofagasta. Además, hay una clara tendencia de disminución en humedad relativa al recorrer el país de oeste a este, así como también al aumentar la altura por sobre el nivel del mar a la que nos encontramos. Así, las zonas precordilleranas del norte de Chile se posicionan como potentes regiones para llevar a cabo experimentos de enfriamiento nocturno. Se destaca la región de Atacama como aquella que acoge más representativamente las condiciones detalladas recientemente.

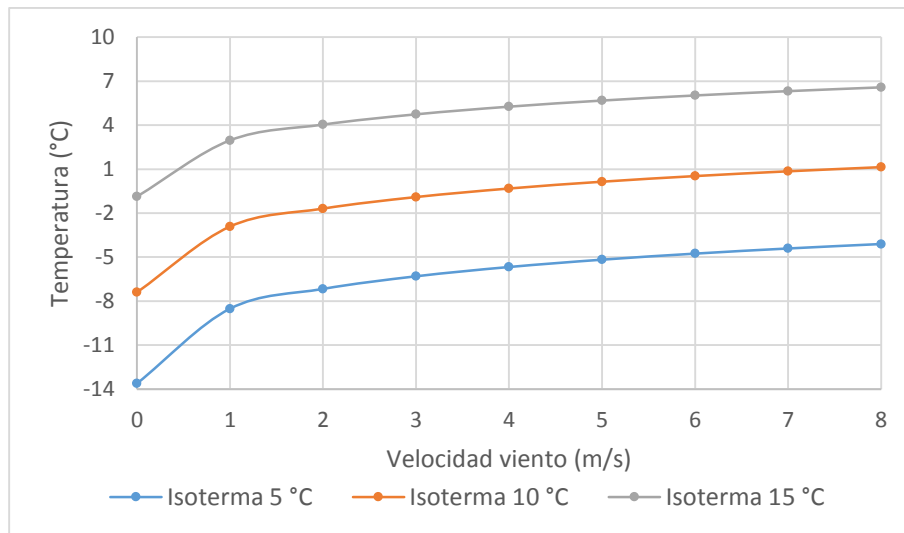


Figura 2.15: Temperatura de radiador en función de la velocidad del viento.

La figura 2.15 indica que mientras mayor sea la velocidad del viento, es decir, mientras mayor sean las cargas convectivas, nuestro sistema de enfriamiento se verá afectado negativamente, siendo menos eficiente para su función.

De acuerdo a informes regionales realizados por Red Agroclima [10], que presentan detalles del comportamiento de la velocidad del viento en diversas zonas del país, las regiones descritas anteriormente coinciden con aquellas que se encuentran más afectadas por las cargas eólicas, por lo que si se pretende realizar mediciones en dichas localidades habría que diseñar un equipo que permita anular las cargas de viento, que producirían un efecto negativo para el enfriamiento del radiador.

### 2.2.3. Resumen

Finalmente, se logra concluir en base a las simulaciones efectuadas que el mayor potencial de enfriamiento radiativo se logrará con un radiador que simule un cuerpo negro y posea un área que le permita interactuar a mayor escala con el cielo nocturno. El enfriamiento nocturno óptimo se encontrará en sitios donde habite un clima seco, con cielo despejado y la menor presencia de viento posible, obteniendo en estas zonas la menor temperatura para nuestro radiador respecto a la temperatura ambiente, logrando así una aplicación de enfriamiento más eficiente.

En consecuencia, se espera que las zonas precordilleranas ubicadas en el norte de Chile sean aquellas áreas donde el enfriamiento radiativo tenga un comportamiento más eficiente, proyectando potencias de refrigeración mayores en comparación a otras zonas del país.

### **3. Construcción del radiador nocturno**

#### **3.1. Primer prototipo**

##### **3.1.1. Proceso constructivo**

Realizado el análisis computacional inicial se procede a la construcción del primer radiador nocturno. El lugar donde estará instalado para ejecutar las mediciones será en el Laboratorio de Energías Renovables (LER) ubicado en la Sede José Miguel Carrera de la Universidad Técnica Federico Santa María, en Viña del Mar. Para ello se dispone de un colector solar de placa plana que será modificado. Posee dimensiones de 2 m de largo y 1 m de ancho. Se retira la cubierta de vidrio, la estructura de tubos y aletas por donde fluye el líquido que se busca calentar en aplicaciones solares, y el material aislante del colector (puesto que se encontraba en mal estado y no apto para sus funciones de aislación) dejando solamente la estructura de aluminio que se encarga de otorgar rigidez al equipo tal como se muestra en la figura 3.1.



Figura 3.1: Estructura del radiador nocturno.

La construcción comprende el montaje de una superficie de espesor 50 mm de lana mineral que opera como aislante (figura 3.2). Sobre ella se instala una placa de aluminio de 0,5 mm de espesor pintada con pintura negro pizarrón que actúa como radiador (figura 3.3) intentando simular en mayor medida un cuerpo negro. Luego, se introduce en los costados placas de poliestireno expandido de 3 mm de espesor recubiertas con láminas de aluminio de modo que posean la menor emisividad posible y sean capaces de reflejar la mayor cantidad de radiación incidente en ellas. Se procede a instalar la pantalla de viento de polietileno que queda distanciada del radiador en 20 mm. Finalmente se ubican las juntas estancas que permiten brindar tensión necesaria a la pantalla de viento y asegurar que el radiador quede aislado del exterior (figura 3.4). Por último, el equipo es ubicado en el sitio donde efectuará las mediciones correspondientes (figura 3.5).



Figura 3.2: Instalación aislante.



Figura 3.3: Instalación placa (cuerpo negro).



Figura 3.4: Radiador con pantalla de viento.



Figura 3.5: Equipo instalado.

### 3.1.2. Procedimiento de medición

Las variables a registrar durante la primera campaña de medición son exhibidas en la tabla 3.1. Por otra parte, el detalle de la instrumentación a utilizar se presenta en la tabla 3.2.

Tabla 3.1: Variables a registrar.

Variable	Unidad de medición
Temperatura de radiador	°C
Temperatura ambiente	°C
Humedad relativa	%
Velocidad de viento	m/s

Tabla 3.2: Detalles instrumentos de medición.

Nombre Instrumento	Marca	Rango de medición	Resolución/ Precisión	Incertidumbre de medición
Data logger T° superficie	Tinytag	[-40 – 125] °C	0,0001 °C	± 0,2 °C
Data logger T° ambiental	Tinytag	[-40 – 85] °C	0,0001 °C	± 1,0 °C
Data logger HR	Tinytag	[0 – 100] %	0,001%	± 1,0%
Estación meteorológica	PCE Instruments	[0 – 70] m/s	0,1 m/s	± 1,0 m/s

Para comenzar el procedimiento de medición se instalan dos termocuplas de superficie que se encargarán de registrar las temperaturas obtenidas por el radiador, una termocupla que medirá la temperatura ambiental de la zona, una termocupla que registrará los valores de humedad relativa y una estación de medición que posee un anemómetro, encargado de determinar la dirección y velocidad del viento en el lugar donde estará instalado el radiador nocturno. Cabe mencionar que estos equipos realizarán mediciones discretas cada 10 minutos, intervalo que servirá para obtener las primeras conclusiones acerca de este experimento.

### 3.1.2.1. Procedimiento de calibración

La calibración de las termocuplas de superficie se efectúa con la comparación del registro de temperatura en el radiador entre un instrumento nuevo, calibrado de fábrica, y las mismas termocuplas, tal como aparece en la figura 3.6. Los sensores de cada termocupla se instalan junto a cada uno del equipo en cuestión.

El instrumento señalado corresponde a un termómetro de contacto digital de marca PCE y modelo T390, capaz de almacenar datos mediante cuatro puertos de entrada. Opera en un rango de temperaturas entre  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $1370\text{ }^{\circ}\text{C}$ , con una resolución de  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  y una precisión de  $\pm 0,4\%$ .



Figura 3.6: Calibración termocuplas con sensor PCE-T390.

El comportamiento observado se refleja en la figura 3.7, donde la rápida variación de temperatura en el radiador fue efectuada forzosamente mediante exposición al sol, cubrimiento con pantalla de viento, sombreamiento y aplicación de corrientes de viento con un ventilador. Observar que la mayor discrepancia en el resultado de los datos registrados ocurre al momento en que se genera un abrupto calentamiento o enfriamiento del radiador, con una diferencia máxima de temperatura registrada de  $3,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  entre las dos termocuplas y sus respectivos sensores patrones. No obstante, cuando la temperatura es relativamente estable, los resultados se comportan de forma bastante similar, con una diferencia de temperatura máxima registrada de  $1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  y un promedio de  $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Señalar que para ambas comparaciones se respeta la misma tendencia y diferencias mencionadas. Debido a que en la

noche los datos almacenados (mostrados a lo largo del presente) se comportan de forma estable, y que bajo dichas condiciones de estabilidad las termocuplas tienen buena respuesta a la comparación con el termómetro análogo, se utilizará un error de medición asociado a la calibración de los instrumentos equivalente a la diferencia promedio obtenida, es decir, el error de medición asociado a la calibración de los instrumentos de superficie será de 0,7 °C.

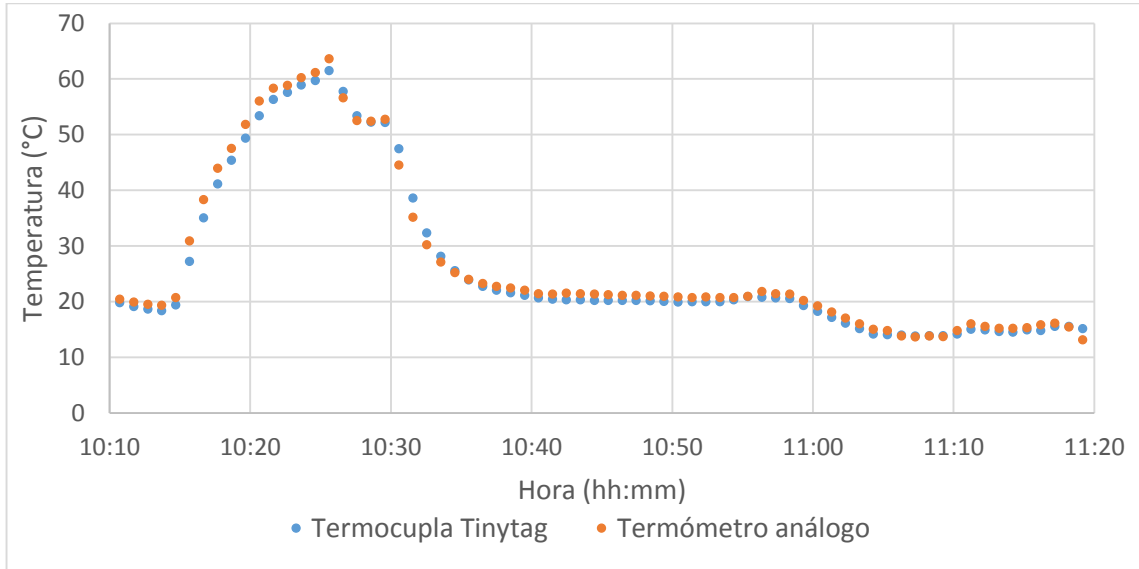


Figura 3.7: Registro de mediciones para calibración de termocuplas de superficie.

### 3.1.3. Error de medición y propagación

El error de medición se asocia a la incertidumbre propia de cada instrumento, así como a la capacidad de resolución que posee para generar registros de mediciones [11]. Su valor equivale a una desviación absoluta respecto al valor medido. Mediante la ecuación 3.1 podemos cuantificar el error perteneciente a cada uno de los instrumentos presentados en la tabla 3.2. Los resultados se exhiben en la tabla 3.3.

$$\sigma_j = \sqrt{(\sigma_{\text{precisión},j})^2 + (\sigma_{\text{incertidumbre},j})^2 + (\sigma_{\text{calibración},j})^2} \quad (3.1)$$

Donde:

- $\sigma_j$ : error de medición de instrumento “j”.
- $\sigma_{precisión,j}$ : error de medición asociado a precisión de instrumento “j”.
- $\sigma_{incertidumbre,j}$ : error de medición asociado a incertidumbre de instrumento “j”.
- $\sigma_{calibración,j}$ : error de medición asociado a calibración de instrumento “j”.

Tabla 3.3: Error de medición propio de cada instrumento.

Instrumento	Cálculo error	Error (desviación absoluta)
Data logger T° superficie	$\sqrt{(0,0001)^2 + (0,2)^2 + (0,7)^2}$	$\pm 0,73$ °C
Data logger T° ambiental	$\sqrt{(0,0001)^2 + (1)^2}$	$\pm 1,0$ °C
Data logger HR	$\sqrt{(0,001)^2 + (1)^2}$	$\pm 1,0\%$
Estación meteorológica	$\sqrt{(0,1)^2 + (1)^2}$	$\pm 1,005$ m/s

Por otro lado, la propagación del error es la medida en que inciden las variables registradas en las funciones matemáticas o físicas que se basan en ellas. Las relaciones en cuestión corresponden a los cálculos de intercambio de calor por convección y radiación entre el radiador con el ambiente y el cielo respectivamente. Las funciones que gobiernan los fenómenos mencionados se presentan respectivamente en las ecuaciones 3.2 y 3.3.

$$\dot{q}_{radiador \rightarrow amb} = h \cdot (T_{rad} - T_{amb}) \quad (3.2)$$

$$\dot{q}_{radiador \rightarrow sky} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_{rad}^4 - T_{sky}^4) \quad (3.3)$$

Donde:

- $\dot{q}$ : flujo de calor que ingresa o sale del radiador hacia el ambiente o el cielo (W/m<sup>2</sup>).
- $h$ : coeficiente de convección entre radiador y ambiente (W/m<sup>2</sup>K). Su valor es extraído de la referencia [12].

- $T_{rad}$ : temperatura de radiador (K).
- $T_{amb}$ : temperatura ambiente (K).
- $T_{sky}$ : temperatura de cielo (K).
- $\sigma$ : constante de Stefan-Boltzmann.  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ .
- $\varepsilon$ : emisividad radiador.

Luego, la propagación de error para las expresiones de las ecuaciones 3.2 y 3.3 se presenta de manera simplificada en las ecuaciones 3.4 y 3.5 respectivamente.

$$\sigma_{\dot{q}_{radiador \rightarrow amb}} = h \cdot \sqrt{(\sigma_{T_{rad}})^2 + (\sigma_{T_{amb}})^2} \quad (3.4)$$

$$\sigma_{\dot{q}_{radiador \rightarrow sky}} = 4 \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{T_{rad}^6 \cdot (\sigma_{T_{rad}})^2 + T_{sky}^6 \cdot (\sigma_{T_{sky}})^2} \quad (3.5)$$

#### 3.1.4. Mediciones y análisis

En el primer prototipo se registraron mediciones desde el 23 de mayo de 2017 hasta el 13 de septiembre del mismo año. Cabe señalar que solamente se consideran las mediciones de temperatura ambiental, humedad relativa y temperatura de radiador. Se descartó la medición de velocidad de viento, ya que el lugar donde se encontraba el radiador prácticamente no estaba expuesto a la presencia de corrientes eólicas y el anemómetro entregaba valores cercanos a 0 m/s todo el tiempo (no superiores a 0,3 m/s). Esto tiene estrecha relación con el entorno donde se encuentra ubicado el radiador en el LER, sitio que está inmerso cercano a un bosque, además de edificaciones que lo rodean. Así, la capa límite de las corrientes de aire no logra influir en el radiador y las leves brisas que pudieran afectarlo eran tan insignificantes que no generaban la inercia necesaria para producir algún valor mensurable por el anemómetro.

Los dos primeros días el radiador estuvo bajo techo en un recinto cerrado, puesto que estaba pronosticado lluvia y se prefirió resguardarlo de ella. De todas formas, podemos observar como la temperatura entre el “ambiente” (interior del recinto) y el radiador son prácticamente

iguales a cualquier hora del día, como aparece en la figura 3.8, lo cual teóricamente era de esperarse, ya que no existen cuerpos que interactúen significativamente de forma radiativa con el prototipo. Así, podemos continuar las mediciones sin anomalías hasta el momento.

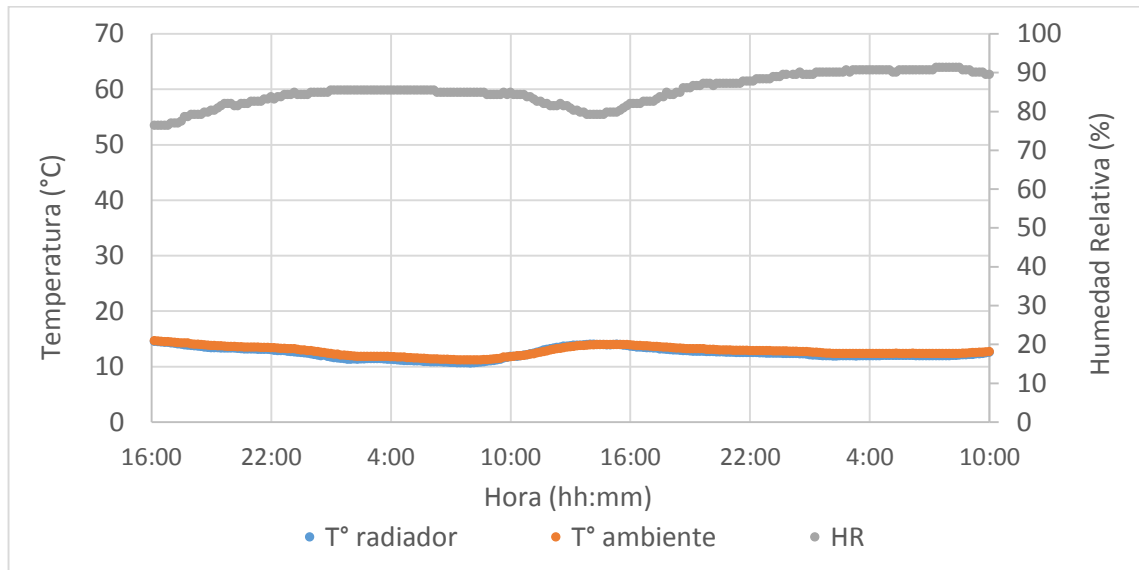


Figura 3.8: Comportamiento radiador en recinto cerrado.

Una vez que el radiador está expuesto al ambiente posee un proceso de enfriamiento dentro del intervalo del día que comprende desde la puesta de sol hasta la salida del mismo al día siguiente, tal como se logra apreciar en la figura 3.9, que refleja la tendencia típica de las variables registradas durante el periodo de mediciones (se muestran 2 noches). En otras palabras, la temperatura del radiador será inferior a la ambiental durante la noche, periodo donde el equipo podrá operar para sus funciones de enfriamiento. A lo largo de las mediciones se alcanzó una diferencia promedio de que ronda los 6 °C, con un valor máximo registrado de 11,74 °C entre el radiador y el ambiente, momento en que la humedad relativa registrada fue de 57,6%. También, en la figura 3.10 se observa que el tramo de la noche en que la diferencia de temperaturas entre el ambiente y el radiador es mayor corresponde al momento en que la humedad relativa es menor (entre las 18:00 y las 00:00 horas). Se reafirma la conclusión previa obtenida del análisis teórico que indicaba que el radiador sería más eficiente en la medida que el clima fuese más seco (con menor humedad relativa). Señalar que dicha conducta se replica en todos los días analizados.

También se destaca la capacidad del radiador de calentarse durante el día, alcanzando una temperatura máxima cercana a los 65 °C (señalar que en verano este valor podría ser considerablemente mayor), lo que genera el debate sobre sistemas que puedan ser utilizados para calentamiento y enfriamiento durante el día y la noche respectivamente. Sin embargo, no es el objetivo de este estudio, por lo que dicha discusión no será sopesada en esta ocasión.

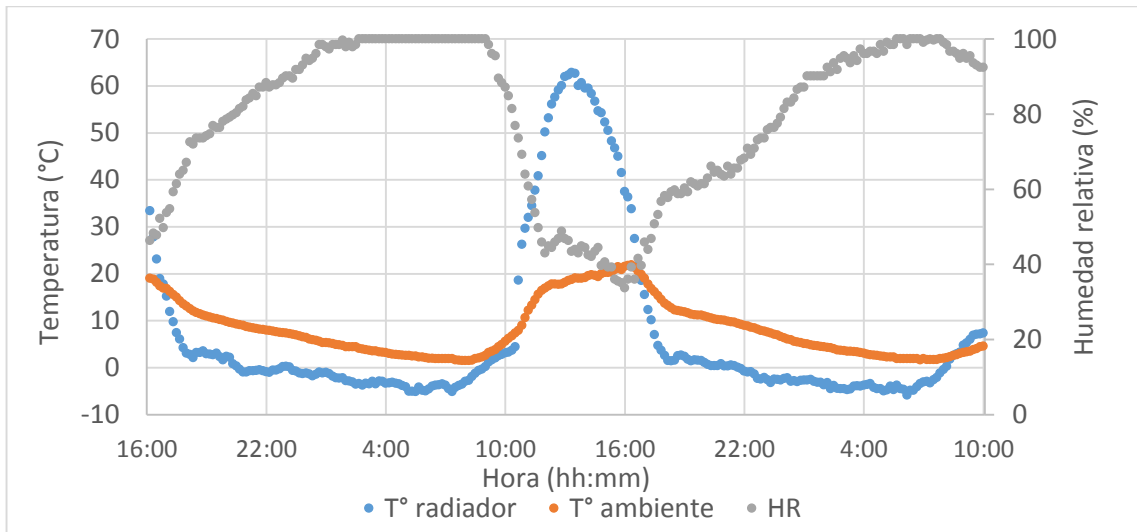


Figura 3.9: Comportamiento radiador en dos noches aleatorias de junio.

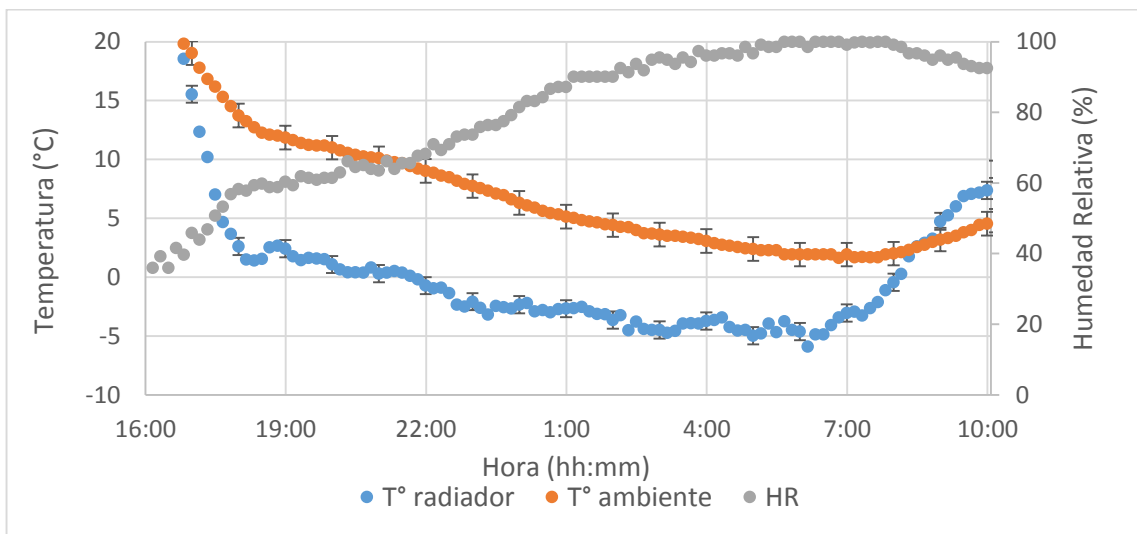


Figura 3.10: Comportamiento radiador en noche aleatoria de junio.

Adicionalmente, la figura 3.11 muestra el comportamiento típico del radiador en un día lluvioso. Durante el día se evidencia cierta diferencia entre la temperatura ambiental y la del radiador producto de la radiación difusa incidente desde el sol, de todos modos ello no aplica al proceso de enfriamiento que nos encontramos estudiando. Sin embargo, se observa que durante la noche se anula cualquier variación de temperatura en el radiador respecto al ambiente, lo que posee estricta relación con el efecto que produce la deposición del agua de la lluvia sobre el radiador, creando una pantalla para la radiación en el espectro entre 8 a 13  $\mu\text{m}$  que no permite que la radiación en dicho intervalo de longitudes de ondas se transmita a través de ella, lo que impide que el radiador intercambie calor en forma de radiación con el cielo nocturno, quedando así, limitado al equilibrio térmico con el ambiente.

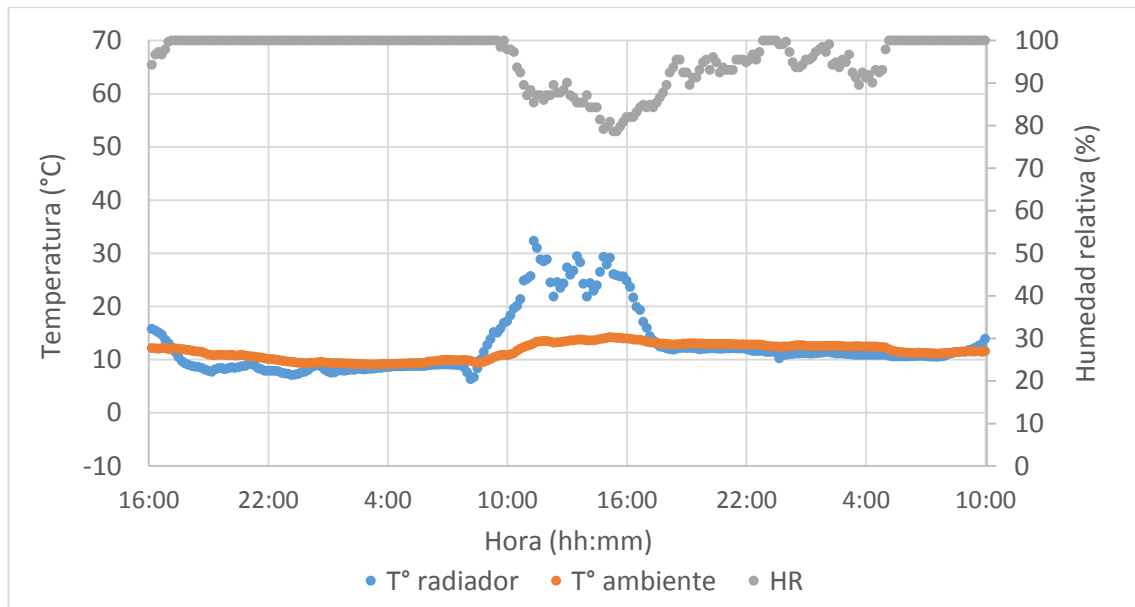


Figura 3.11: Comportamiento radiador en día lluvioso.

Finalmente, se destaca que en los horarios donde la radiación solar directa no está presente el radiador posee cierto potencial de enfriamiento, alcanzando valores de diferencias de temperaturas ya observados en los estudios experimentales señalados al comienzo del presente informe. Ello nos da ímpetu para realizar un estudio más en detalle que abarque otras zonas geográficas del país que poseen condiciones climáticas distintas e incluso donde teóricamente se debiesen lograr mayores tasas de enfriamiento nocturno.

Para estudiar y cuantificar el potencial de enfriamiento radiativo nocturno como flujo de calor en distintas regiones del país procedemos a la construcción de dos prototipos más pequeños que actuarán como radiadores y registrarán los datos necesarios para calcular el enfriamiento nocturno. Uno de ellos estará provisto de pantalla de viento mientras que el otro no dispondrá de ella. Así, podremos evidenciar de forma experimental el real impacto que otorga la pantalla de viento al proceso de enfriamiento sobre el radiador en las zonas donde esté instalado. Además, los nuevos equipos de estudio serán modulares, lo que será una ventaja en la logística de transporte e instalación temporal donde sea requerido, he ahí la razón en la disminución de sus tamaños respecto al primer prototipo.

## **3.2. Prototipos modulares**

### **3.2.1. Proceso constructivo**

El proceso constructivo es equivalente al presentado para el montaje del primer prototipo. Se procede a la fabricación de dos equipos de dimensiones 0,365 m x 0,54 m de ancho y largo respectivamente, como se ven en la figura 3.12. Uno de ellos está provisto de pantalla de viento ubicada a 38 mm de distancia del radiador, mientras que el otro no cuenta con ésta de modo que queda expuesto al ambiente. El fin de esta diferencia entre ambos radiadores es determinar experimentalmente la incidencia del resguardo a la convección en el resultado final para distintos climas. Así, se espera que en zonas donde los radiadores estén expuestos a cargas eólicas la diferencia en la temperatura entre ellos difiera en mayor medida que en aquellas donde no existe presencia de viento.



Figura 3.12: A la izquierda: radiador expuesto a la atmósfera. A la derecha: radiador con pantalla de viento.

### 3.2.2. Procedimiento de medición

El procedimiento de las series de mediciones detalladas a continuación es equivalente al del primer prototipo, con las dos termocuplas de superficie (esta vez una para cada radiador), una termocupla para temperatura ambiental y una termocupla para registrar humedad relativa. El uso de anemómetro será especificado en conjunto a la descripción de cada zona geográfica donde se realicen las mediciones correspondientes. De aquí en adelante, los instrumentos de mediciones almacenarán datos discretos en intervalos de 5 minutos. El detalle de la instrumentación mencionada fue anteriormente presentado en la tabla 3.2.

### 3.2.3. Verificaciones previas

Primero se instaló el radiador modular con pantalla de viento junto al equipo inicial (de dimensiones 2 m x 1 m) como aparece en la figura 3.13 para verificar, como indica la simulación, que la tendencia de los resultados fuese similar. Se espera que el radiador de mayores dimensiones alcance menores temperaturas respecto al radiador modular. El fin de esta comparación es otorgar confiabilidad al equipo pequeño en cuanto a su comportamiento a la hora de registrar mediciones.



Figura 3.13: Comparación radiador original y radiador modular.

Los resultados se pueden verificar en la figura 3.14. Como era de esperar, los valores no son iguales debido al área correspondiente a cada radiador. No obstante, las curvas de datos presentan el mismo comportamiento y tendencia, lo que indica que es posible continuar con

nuestro estudio, esta vez con radiadores modulares que permitan un transporte sencillo a diversas zonas del país. Además, destacar la menor reducción que presenta el radiador modular en el horario de puesta de sol en comparación al otro equipo, donde el intercambio radiativo se genera con menor interferencia debido a la menor humedad relativa.

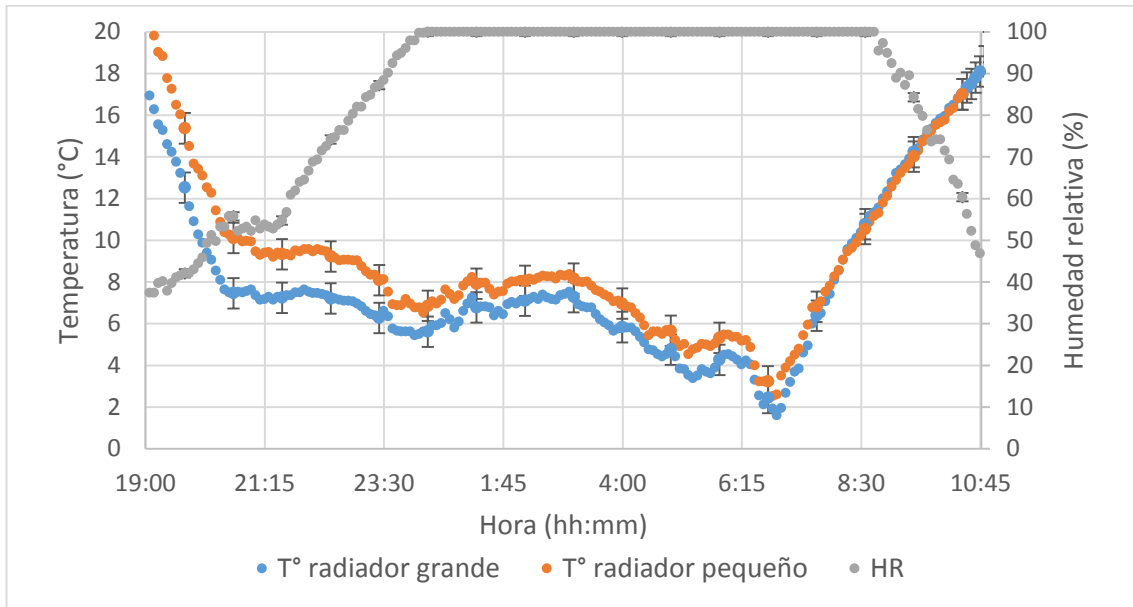


Figura 3.14: Comportamiento de radiador original y radiador modular.

En segundo lugar, se realizó mediciones en ambos radiadores pequeños, esta vez los dos sin pantalla de viento con el fin de verificar que bajo las mismas condiciones los resultados se comportan idénticamente iguales y poder establecer así, conclusiones de las eventuales variaciones en las temperaturas de los radiadores cuando se encuentren instalados con y sin pantalla de viento según corresponda. La figura 3.15 da cuenta del comportamiento equitativo en ambos equipos. La figura 3.16 es un acercamiento más preciso a los datos registrados durante distintas noches, periodo del día que es más trascendente para nuestro estudio. En la figura 3.16 también se observa equidad en el valor de los datos medidos, lo que nos da certeza que las comparaciones a realizar posteriormente serán válidas y no estarán alteradas por errores asociados a la brecha de resultados pertenecientes a las placas que actúan como

radiadores, pudiendo determinar el impacto de los parámetros constructivos que afecten a ambos equipos.

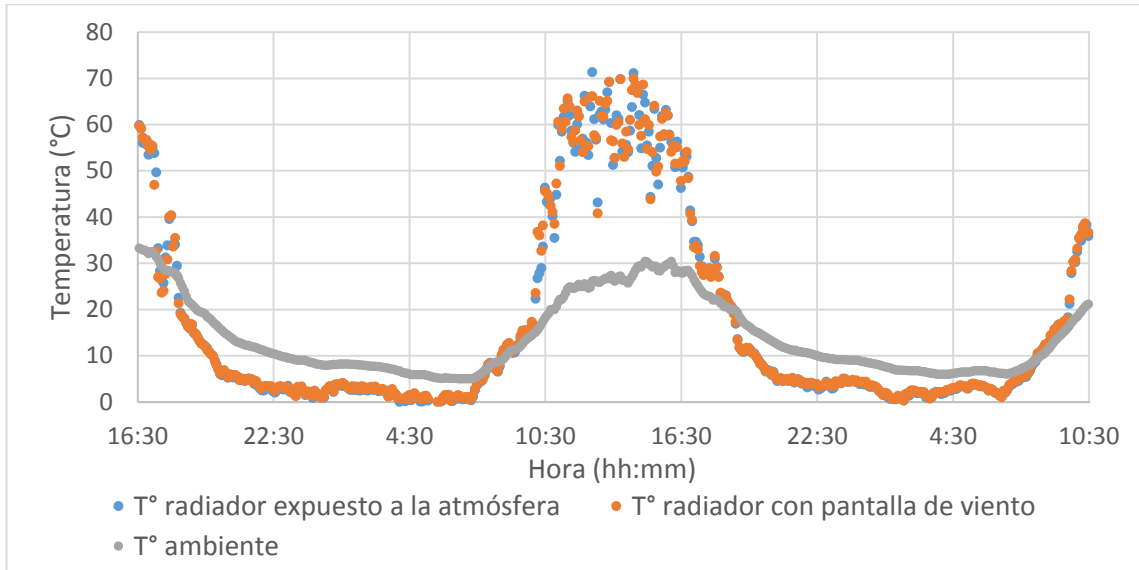


Figura 3.15: Radiadores expuestos a la atmósfera.

Nota: Leyenda “T° radiador con pantalla de viento” indica que será el radiador que contará eventualmente con pantalla de viento.

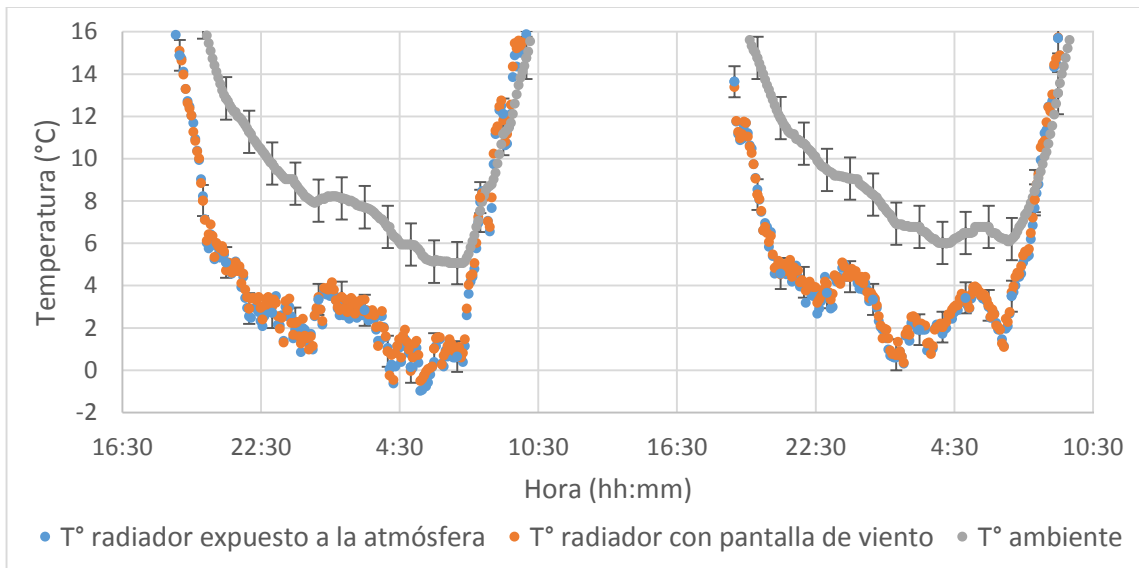


Figura 3.16: Radiadores expuestos a la atmósfera.

### **3.2.4. Zonas de medición**

En Chile continental encontramos una amplia gama de condiciones climáticas. A grandes rasgos se distribuye como sigue. El norte presenta un clima seco con altas temperaturas. La zona central posee un clima mediterráneo (verano seco y caluroso, invierno lluvioso y templado, otoño y primavera variables en temperaturas y precipitaciones). El sur del país exhibe un clima más húmedo y susceptible a precipitaciones a lo largo de todo el año.

La zona sur ha sido descartada para el registro de mediciones. Los resultados expuestos en la figura 3.11 y los antecedentes lluviosos que destacan a las regiones al sur de Chile evidencian a simple vista que el potencial de enfriamiento ha de ser inferior en comparación a otras zonas. Además, la anulación en la variación de la temperatura del radiador durante los días lluviosos respecto a la temperatura ambiente no permitirá obtener conclusiones sobre la incidencia de las otras condiciones ambientales.

En virtud de la disponibilidad que tenemos en distintas localidades del país para instalar los radiadores y disponerlos a realizar mediciones, las zonas escogidas para cuantificar el potencial de enfriamiento nocturno han de ser 3: Viña del Mar y Santiago, ubicadas en la zona central del país, y Copiapó, emplazado en la III Región, en el norte del país.

A continuación serán descritos brevemente los comportamientos climáticos de cada zona durante los meses primaverales (pues serán aquellos en que se desarrollen las mediciones) en base a datos recopilados de la plataforma Agromet [13] del Ministerio de Agricultura.

#### **3.2.4.1. LER UTFSM – Viña del Mar**

Esta zona presenta una temperatura promedio de alrededor 15 °C con una máxima que oscila los 25 °C y una mínima no inferior a 8 °C.

La humedad relativa del sector es bastante variable durante el día, llegando a un mínimo de alrededor de 20%, aumentando posterior a la puesta de sol y alcanzando rápidamente la saturación durante la noche hasta la amanecida del día posterior, donde comienza a disminuir progresivamente.

Existen ráfagas de viento intermitentes que no logran superar los 5 m/s (menores a 20 km/h). De todas formas, en general la presencia de viento es escasa en la ubicación geográfica donde se emplaza el LER. No así al acercarnos al borde costero de la ciudad.

Las lluvias por lo general no se presentan con regularidad en dicha época del año, salvo días puntuales de comportamiento anómalo donde pueden caer inciertos milímetros de agua. Sin embargo, un día normal no exhibe precipitaciones.

#### **3.2.4.2. Campus San Joaquín (CSJ) UTFSM – Santiago**

El comportamiento de la temperatura ambiental oscila entre 6 y 34 °C, destacando las temperaturas típicas por sobre los 20 °C en las horas de atardecida, lo que acusa un potencial uso de sistemas de ventilación o acondicionamiento para el confort térmico en el hogar.

Por lo general, en comparación a la zona anterior el clima es más seco, con valores de humedad relativamente constantes que rondan los 20% o menos durante el día. En la noche se alcanza por instantes breves a la saturación, momentos antes de la amanecida, donde la humedad comienza a disminuir rápidamente hasta estabilizarse en los valores antes mencionados.

Al igual que la zona anterior, la presencia de viento es escasa, con una conducta diaria promedio de 2 a 3 m/s y ráfagas inferiores a 5 m/s. De todas maneras, los mayores valores para esta variable se presentan durante los horarios diurnos.

Finalmente, la presencia de lluvia posee un comportamiento equitativo al de la zona anterior. Casi no se evidencian precipitaciones durante esta fecha.

#### **3.2.4.3. Copiapó**

En Copiapó, la temperatura oscila entre 15 y 30 °C aproximadamente con medias cercanas a los 20 °C.

La humedad relativa posee un comportamiento que no supera los 20% como límite inferior, situación que se produce a mediodía. Luego se genera un aumento a 40% que permanece estable hasta la puesta de sol, donde la humedad comienza a aumentar hasta la saturación.

La presencia de viento en Copiapó es relativamente constante y oscila entre 4 a 5 m/s aproximadamente. Al igual como se mencionó anteriormente, en la noche es cuando los valores de velocidad de viento son inferiores.

Luego, las precipitaciones son normalmente nulas en esta época del año y en general inexistentes a lo largo de todo el año.

#### 3.2.4.4. Resumen variables a registrar

De las descripciones anteriores llegamos al siguiente cuadro resumen. En la tabla 3.4 se describen las variables a registrar en cada zona. La incidencia esperada es en base al análisis de sensibilidad efectuado al comienzo del informe. En el caso de la velocidad de viento solo se espera que tenga efectos significantes en el norte, pues en los otros sitios es bastante baja para producir efectos considerables en la temperatura del radiador, sobretodo en la noche.

Tabla 3.4: Resumen de mediciones a efectuar en cada zona.

Zona de medición	VARIABLES	Registro	Incidencia esperada
Viña del Mar	Temperatura ambiente	Sí	-
	Humedad relativa	Sí	Alta
	Velocidad de viento	No	Baja
Santiago	Temperatura ambiente	Sí	-
	Humedad relativa	Sí	Alta
	Velocidad de viento	Sí	Baja
Copiapó	Temperatura ambiente	Sí	-
	Humedad relativa	Sí	Alta
	Velocidad de viento	Sí	Alta

Posteriormente, se ejecutarán dos análisis específicos. El primero corresponde en someter a los radiadores a cargas de viento mediante un ventilador. El siguiente es instalar un sistema de sombreado para verificar los efectos que posee sobre el radiador. Los detalles de operación y resultados serán especificados en sus secciones de análisis correspondientes.

### **3.2.5. LER UTFSM: Mediciones y análisis**

La primera zona donde se evalúan ambos radiadores (uno con pantalla de viento y el otro expuesto a la atmósfera) es en el LER de la UTFSM, en Viña del Mar. El contraste se llevó a cabo durante las primeras dos semanas de noviembre. Los equipos instalados se observan en la figura 3.12.

#### **3.2.5.1. Temperatura**

Los valores y comportamientos típicos en los radiadores se exponen en la figura 3.17. Durante el horario diurno la máxima temperatura es alcanzada por el radiador que posee pantalla de viento con registros ampliamente superiores a los del equipo expuesto, mientras que durante la noche los resultados presentan valores equivalentes. A causa que la presencia de viento es prácticamente nula, los resultados acusan que la pantalla de viento no es del todo transparente a la radiación infrarroja en el intervalo de la ventana de cielo y la diferencia de magnitud mostrada por los radiadores durante el día respecto a la exhibida en ellos durante la noche se debe a la alta tasa de flujo de calor que emite el radiador hacia el ambiente al intentar reparar el gran desequilibrio térmico generado por la radiación solar, que al reflejarse en la pantalla de viento produce un efecto invernadero que da como resultado el alza de temperaturas en la placa radiadora (tal como sucede en los colectores solares con la cubierta de vidrio) a diferencia del que se encuentra expuesto, que puede liberar el exceso de calor en forma de radiación de forma libre al ambiente. No obstante, nos centraremos en el proceso de enfriamiento generado en la noche.

Así, la máxima diferencia de temperaturas registrada durante las noches de prueba fue de 10,42 °C para el radiador expuesto (a las 20:00 horas y 44,4% de HR) y 9,70 °C para el equipo con pantalla (a las 20:10 horas y 62,9% de humedad relativa) con promedios de diferencia de temperaturas cercanos a 5,5 °C y 4,0 °C respectivamente. Destacar que ambos instantes corresponden a un horario en que se generó la puesta de sol, consecuente con las conclusiones anteriores donde también existe un bajo porcentaje de humedad relativa contenida en el ambiente.

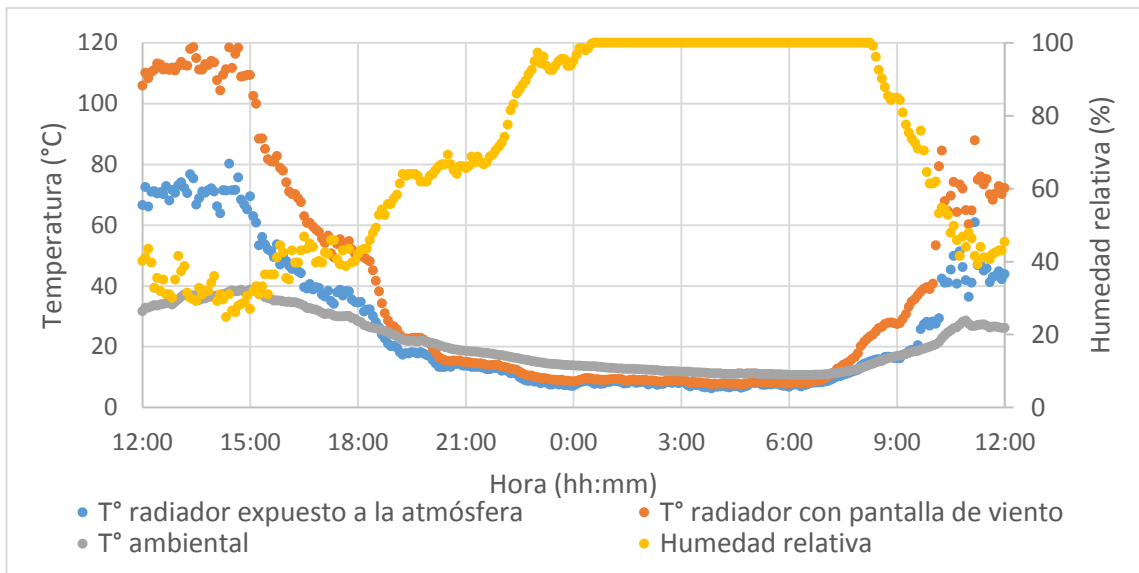


Figura 3.17: Comportamiento típico para radiadores en Viña del Mar.

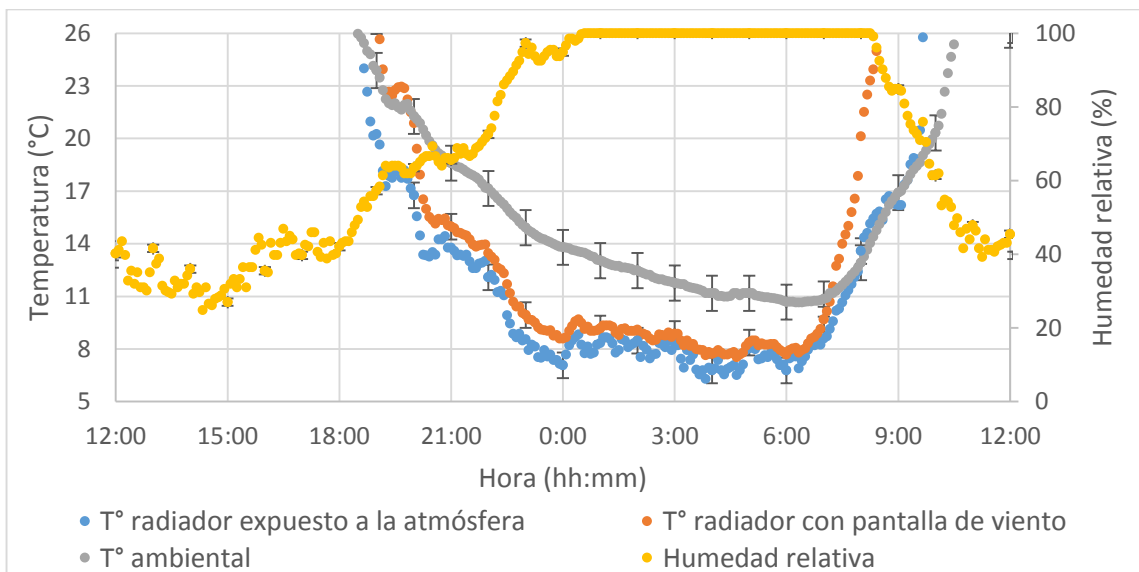


Figura 3.18: Comportamiento típico para radiadores en Viña del Mar.

### 3.2.5.2. Flujo de calor

La ausencia de radiación solar durante la noche permite analizar en detalle el flujo de calor neto liberado hacia el ambiente y el cielo por ambos radiadores, efectuando la suposición que no existen cuerpos adicionales al cielo que interactúen radiativamente con nuestros equipos.

En la figura 3.19 se presentan en detalle aquellos datos correspondientes a una noche aleatoria pero representativa de acuerdo al comportamiento de la temperatura en los radiadores observado durante las semanas de mediciones.

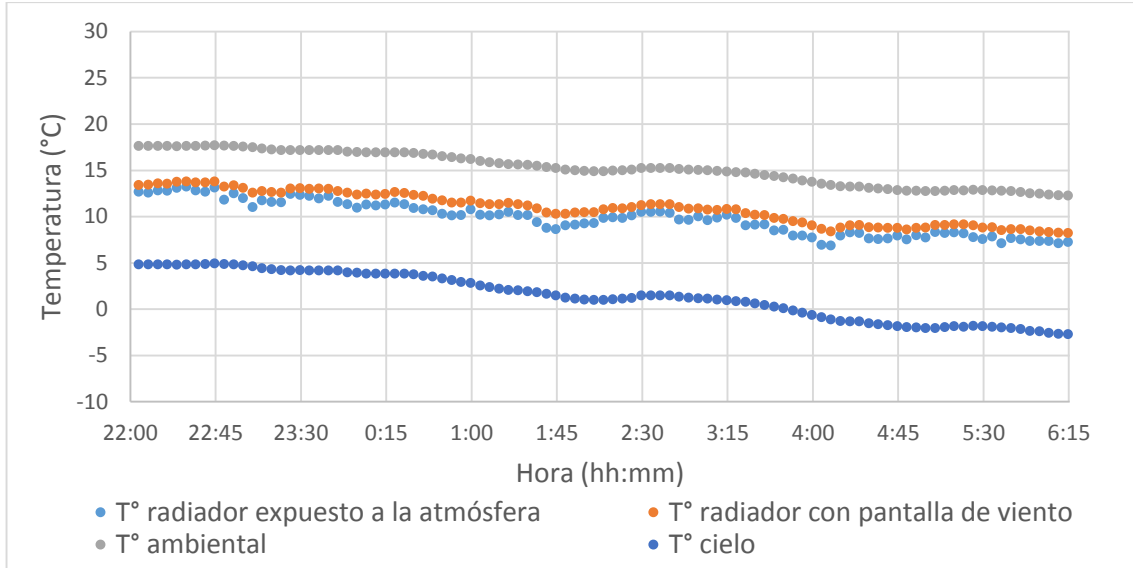


Figura 3.19: Comportamiento de temperaturas para noche aleatoria.

Luego, los cálculos para el intercambio energético que tiene lugar entre el radiador con el ambiente y el cielo nocturno se determinan en base a los datos obtenidos experimentalmente en cada espacio temporal discreto registrado mediante las expresiones presentadas en las ecuaciones 3.2 y 3.3 respectivamente (presentadas nuevamente) a excepción de la temperatura de cielo donde se utilizará la correlación teórica de la ecuación 3.6 [3]. Por la disposición de los términos de temperaturas,  $\dot{q}>0$  hace referencia a que el radiador está entregando calor, mientras que  $\dot{q}<0$  señala que el radiador se encuentra recibiendo calor.

$$\dot{q}_{radiador \rightarrow amb} = h \cdot (T_{rad} - T_{amb}) \quad (3.2)$$

$$\dot{q}_{radiador \rightarrow sky} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_{rad}^4 - T_{sky}^4) \quad (3.3)$$

$$T_{sky} = (0,006 \cdot T_{dp} + 0,74)^{0,25} \cdot T_{amb} \quad (3.6)$$

Donde:

- $T_{sky}$ : Temperatura de cielo (K).
- $T_{amb}$ : Temperatura ambiente (K).
- $T_{dp}$ : Temperatura de punto de rocío ( $^{\circ}$ C).

Se resumen los resultados obtenidos para los flujos de calor presentes entre los radiadores con el cielo nocturno y el ambiente en las figuras 3.20 y 3.21 respectivamente, haciendo énfasis en los horarios nocturnos. Se presenta una noche aleatoria y representativa.

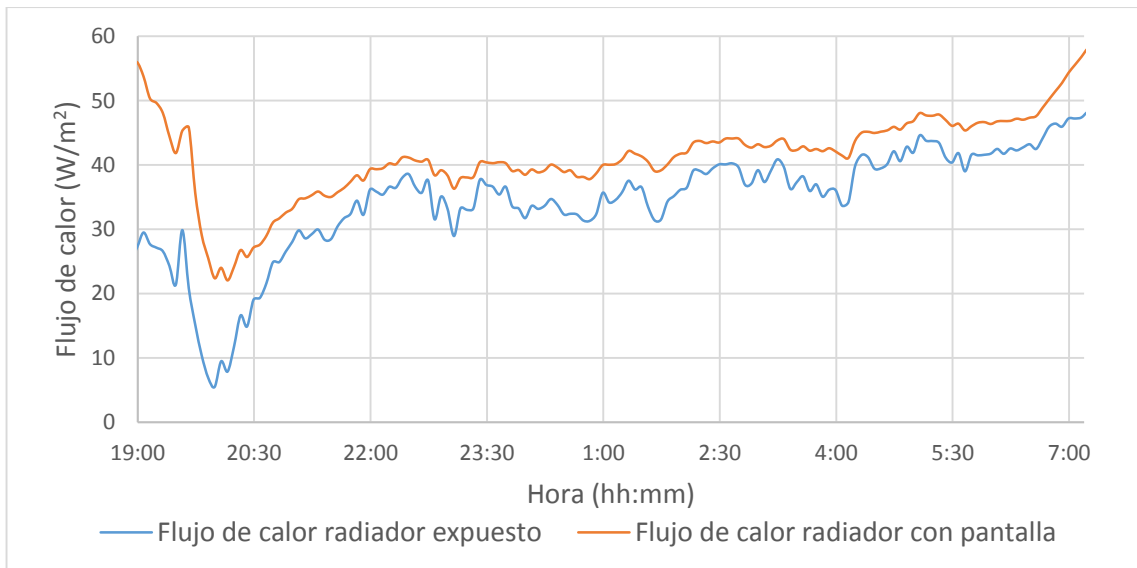


Figura 3.20: Flujo radiativo de calor entre radiadores y el cielo nocturno.

Si bien el intercambio radiativo entre el radiador y el cielo ocurre durante las 24 horas del día, es posible cuantificarlo de mejor forma durante la noche, puesto que no registramos datos de radiación solar en el horario diurno. Se observa que en las horas de la madrugada (entre 2:00 y 6:00 aproximadamente) se obtiene la mayor liberación de calor radiativo por parte del equipo hacia el cielo nocturno, lo que coincide con el mayor distanciamiento entre las temperaturas de los cuerpos mencionados (radiador y cielo), tal como se vio en la figura 3.19.

De allí en adelante, el intercambio es alterado por la radiación solar, por lo que los datos elevan sus valores de sobremanera, entregando una versión alterada de resultados.

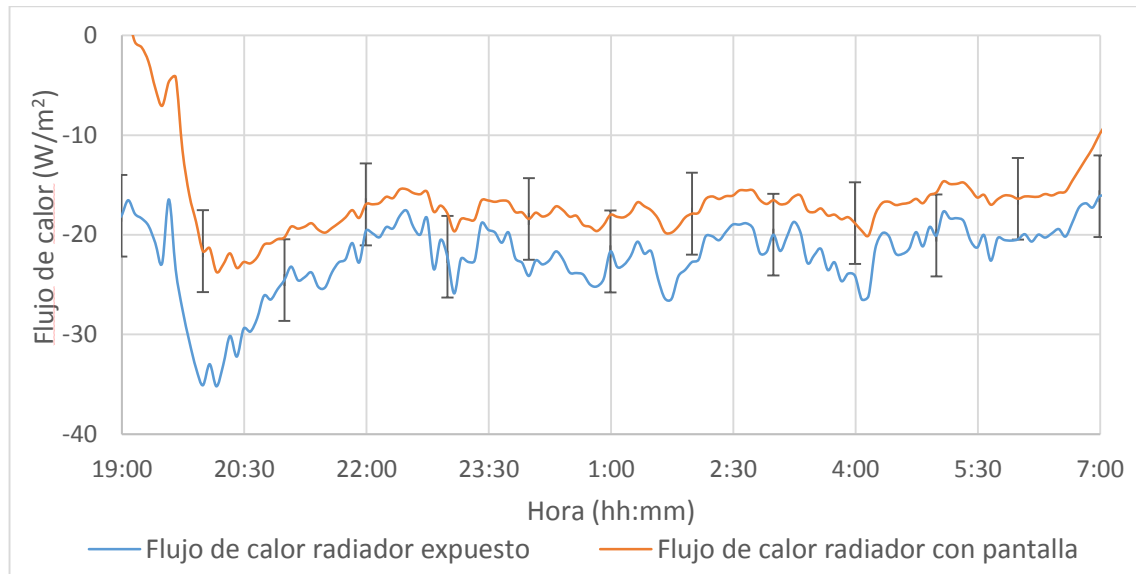


Figura 3.21: Flujo convectivo de calor entre radiadores y el ambiente.

Destacar, como era de esperar, que el potencial de enfriamiento respecto al ambiente es mayor en el radiador expuesto, ya que alcanza temperaturas menores durante la noche en comparación al equipo con pantalla de viento. El radiador expuesto alcanzó una razón de enfriamiento máxima de  $42 \text{ W/m}^2$  y promedio de  $18 \text{ W/m}^2$ . Por su parte, el radiador con pantalla de viento tuvo un enfriamiento máximo de  $39 \text{ W/m}^2$  y promedio de  $15 \text{ W/m}^2$ . Así, con ambos equipos superamos las potencias de enfriamiento máximas exhibidas en los estudios internacionales de la sección sobre experimentos con resultados interesantes.

En la figura 3.22, que muestra el comportamiento de la temperatura del radiador respecto al ambiente en una noche típica, así como el flujo de energía que se obtiene de la diferencia entre éstas, se aprecia que lógicamente el intervalo en que el radiador posee un flujo de energía negativo, es decir, podría ser usado para aplicaciones de enfriamiento, coincide exactamente con los instantes en que la temperatura del mismo es inferior a la ambiental. Sin embargo, lo que resulta interesante destacar en el mismo gráfico es que la potencia máxima de enfriamiento en el radiador (marcado con una línea vertical) surge instantes antes que la

misma se despliegue dentro de un rango de oscilación estable, o sea, ocurre justo antes que comience la noche en su totalidad, lo cual sucede al ocaso, exactamente cuando acaba de ocurrir la puesta de sol y tiene estrecha relación con coincidir en ser el instante de la noche que posee menor humedad relativa, por lo que la transferencia de calor entre el radiador y el cielo nocturno se desarrolla de forma más eficiente. Como se mostró en la figura 3.9 y se explicó en su debido momento, dicho comportamiento asociado a la humedad relativa se replica para todos los días analizados. Luego, se corrobora que tal como se señaló en el experimento realizado por la Universidad de Chile en el desierto de Atacama la potencia máxima de enfriamiento para un radiador nocturno tiene cabida en la hora crepuscular.

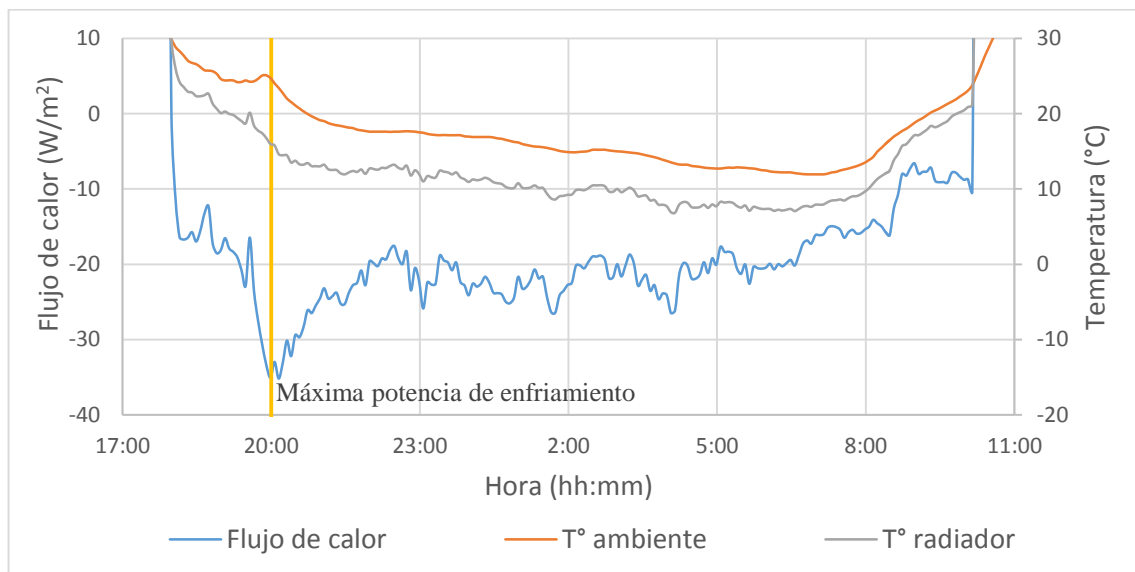


Figura 3.22: Comportamiento radiador expuesto.

### 3.2.5.3. Resumen

Se infiere preliminarmente que para aplicaciones de enfriamiento en zonas donde no afecte la presencia de viento es levemente más eficiente un sistema expuesto completamente al ambiente, o sea, desprovisto de pantalla de viento debido a que la última interfiere sutilmente en el intercambio radiativo entre la placa y el cielo nocturno. Así, en caso que el material de la pantalla de viento asegure un 100% de transparencia a la radiación infrarroja en el intervalo de la ventana de cielo el sistema debiese teóricamente ser indiferente a la presencia de la pantalla o la exposición total hacia el ambiente.

Respecto al enfriamiento máximo del radiador en comparación al ambiente, el hecho que ocurra en el exacto instante en que está dándose término a la puesta de sol induce a pensar en “adelantarla” voluntariamente (desde la perspectiva del radiador, por ejemplo, sombreándolo con un biombo) para observar los efectos que tiene en la potencia de enfriamiento del equipo. Lo lógico sería esperar que se extendiera el intervalo en que la temperatura del radiador es inferior a la ambiental, puesto que el equipo estaría recibiendo solamente radiación indirecta de parte del sol y podría intercambiar calor radiativo de manera más libre con el cielo, es decir, sin la interferencia de la radiación solar directa. También se esperaría que se genere un aumento en la potencia máxima de enfriamiento respecto al ambiente por la menor humedad relativa existente en ese momento, pues cabe recordar que junto con la puesta de sol se lleva a cabo el incremento en el valor de la humedad relativa hasta alcanzar la saturación total durante la noche.

### **3.2.6. CSJ UTFSM: Mediciones y análisis**

El segundo sitio de evaluación corresponde a Santiago. Los equipos fueron instalados en las dependencias del Campus San Joaquín de la UTFSM tal como se ve en la Figura 3.23. El comportamiento típico de las mediciones así como la tendencia de sus valores son equivalentes a los observados anteriormente. Sin embargo, esta vez registramos valores de velocidad de viento presente en el lugar donde estaban ubicados los radiadores.



Figura 3.23: Radiadores instalados en Santiago.

### 3.2.6.1. Temperatura

Las diferencias máximas observadas entre las temperaturas de los equipos y el ambiente son de 9,42 °C para el radiador expuesto (a las 18:25 horas y 15,0% de HR) y de 5,39 °C para el análogo con pantalla de viento (a las 3:00 horas y 76,4% de HR). Los promedios respectivos de enfriamiento son de aproximadamente 4,5 °C y 3,3 °C. Cabe señalar, que los valores de diferencias máximas y promedios son inferiores en Santiago en comparación a lo observado en Viña del Mar. Además, se presenta una anomalía pues los valores máximos no se generan en los instantes de puesta de sol, y para el caso del equipo con pantalla tampoco se produjo en un momento en que la humedad fuera la menor exhibida durante ese día.

La figura 3.24 muestra la comparación para el comportamiento típico de humedad relativa registrada en las dos zonas mencionadas recientemente. Observar que, contrario a lo que debiésemos esperar en función de las temperaturas en los radiadores, Santiago exhibe un clima más seco que Viña del Mar, con una humedad relativa aparentemente constante que oscila alrededor de 20% durante el día, alcanzando la saturación en instantes breves de la noche. Entonces, es preciso estudiar el resto de las condiciones operacionales previo a rechazar las conclusiones premeditadas de los análisis efectuados en las secciones anteriores.

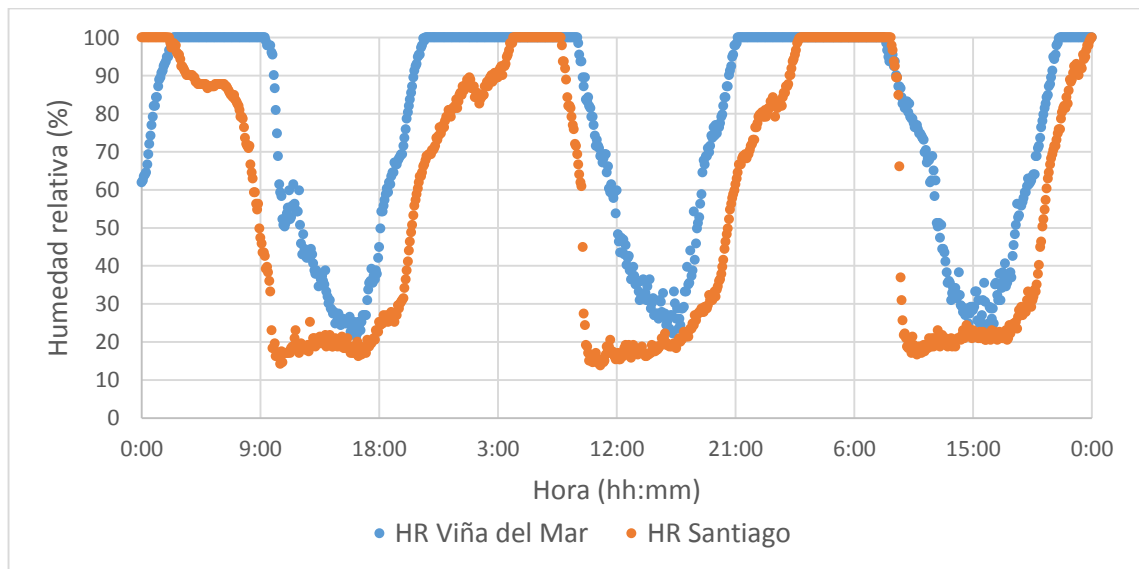


Figura 3.24: Comportamiento humedad relativa en Santiago y Viña del Mar.

La figura 3.25 muestra la distribución de temperaturas en los radiadores y la velocidad de viento registrada. Como se observa en los dos días representativos seleccionados, la velocidad posee un comportamiento con tendencia clara (dentro de la dispersión existente en los datos). Presenta sus valores más elevados durante la jornada diurna, sobretodo en el horario de la tarde (entre 15:00 y 17:00 aproximadamente). Durante la noche manifiesta valores restringidos que en promedio no superan ráfagas de 2 m/s. Como se ve en las temperaturas de los equipos, las corrientes de viento existentes no producen una alteración significativa en el enfriamiento de las placas, ya que tal como se observó en Viña del Mar el radiador expuesto sigue obteniendo las temperaturas más bajas, por lo que la pantalla de viento no ha sido un factor constructivo clave en nuestro diseño hasta el momento.

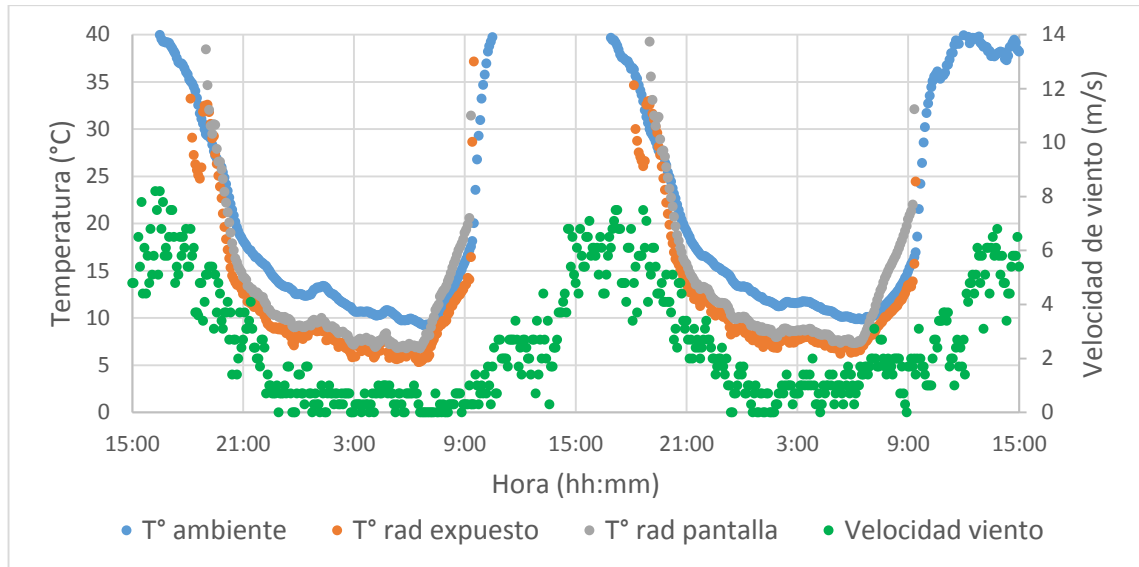


Figura 3.25: Temperaturas de radiadores y velocidad de viento.

### 3.2.6.2. Flujo de calor

Se muestran días representativos en la figura 3.26. Nuevamente el radiador expuesto presenta un mayor potencial de enfriamiento respecto al ambiente en comparación al análogo con pantalla de viento. El potencial máximo observado fue de 38 W/m<sup>2</sup> y 22 W/m<sup>2</sup> respectivamente. El enfriamiento promedio obtenido fue de 15 W/m<sup>2</sup> y 12 W/m<sup>2</sup> respectivamente para las noches en que los radiadores estuvieron registrando mediciones.

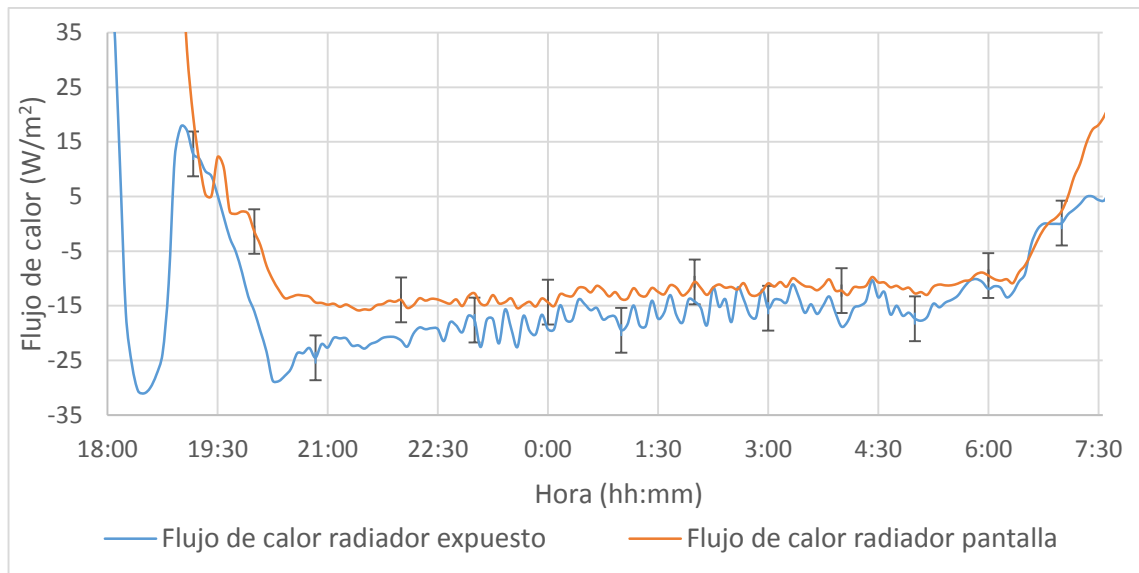


Figura 3.26: Flujo de calor convectivo entre radiadores y el ambiente.

Se evidencia que el instante en que el potencial de enfriamiento es ciertamente mayor para el radiador expuesto es alrededor de las 18:30 horas, comportamiento replicado para todos los días observados. Es muy probable que el equipo haya recibido sombreado en ese instante del día por alguna estructura cercana a él, lo que sumado a la baja humedad existente en ese momento produjo la abultada disminución de temperatura con respecto al ambiente. Sin embargo, se desconoce por qué esta situación no afecta al comportamiento del radiador con pantalla de viento. Una alternativa sería pensar que la inercia térmica generada por el efecto invernadero producido entre el radiador con pantalla y la misma es pequeña y no se alcanza a percibir el cambio de temperatura generado por el sombreado. De todos modos, es una teoría que se desconoce a ciencia cierta, por lo que no se efectuarán conclusiones al respecto.

### 3.2.6.3. Resumen

Finalmente, en virtud que aún no existe una incidencia clara de las cargas eólicas sobre el comportamiento en los equipos y que no se exhibe en ellos la lógica que respecta a la humedad relativa en comparación a la magnitud de resultados obtenidos en la quinta región, se espera que las posibles causantes del reducido potencial de enfriamiento sean dos: primero, que la pantalla de viento no sea un aislante eficiente de cargas de viento; segundo, que la contaminación ambiental existente en la región metropolitana sea la causante de reducir el

potencial de enfriamiento a los radiadores, pues resulta probable que la nube de gases contaminantes interfiera en el intercambio radiativo entre los radiadores y el cielo. Luego, se deja abierto el debate de cómo estimar dicha interferencia y estudiar las implicancias que presenta en el potencial de las energías renovables para dichas zonas (solar, enfriamiento pasivo, etc.).

Además, resultaría interesante estudiar las consecuencias que produciría una pantalla de sombreamiento en la reducción máxima de temperatura alcanzada por el radiador respecto al ambiente, así como presenciar la amplitud con que se extiende el intervalo de potencial enfriamiento a lo largo del día.

### **3.2.7. NORTE: Mediciones y análisis**

La última zona de medición es Copiapó. Los radiadores y la estación de medición que registra velocidad de viento se ubicaron en el techo de una casa, como se ve en la figura 3.27. Nuevamente, la tendencia del comportamiento de las mediciones es equivalente a los observados hasta el momento.



Figura 3.27: Radiadores instalados en Copiapó.

#### **3.2.7.1. Temperatura**

Durante las noches en que los radiadores estuvieron registrando mediciones, las máximas diferencias de temperatura respecto al ambiente fueron de 4,10 °C (a las 3:30 horas y 99% de HR) y 3,43 °C (a las 4:30 horas y 100% de HR) para los equipos expuesto y con pantalla de

viento respectivamente. Luego, los promedios de enfriamiento respectivos fueron de 2,4 °C y 1,9 °C. Nuevamente se presenta una situación irregular, pues el mayor distanciamiento de temperaturas se ha producido en ambos radiadores en horas de la madrugada e instantes en que el ambiente está completamente saturado, lo que es opuesto a lo postulado por la teoría y observado en reiteradas ocasiones en Viña del Mar.

Independiente de la anomalía señalada, el potencial de enfriamiento se verá bastante acotado por la ínfima disminución que alcanzan los radiadores respecto al ambiente. Este escenario resulta complejo de analizar por lo siguiente:

- Observando la figura 3.28, podemos apreciar que la humedad relativa en Copiapó fue de comportamiento promedio a lo largo de la noche, con respecto a lo registrado en las otras zonas, por lo que esta variable no explica el comportamiento irregular observado. Como acotación, señalar que la zona más adecuada para el enfriamiento (solo en función de esta variable) es Santiago, que a pesar de ser la que se encuentra más al sur de las tres, coincide con ser la más cercana a la cordillera.
- Lamentablemente, la estación de medición de velocidad de viento no tuvo el desempeño esperado, pues no registró mediciones, por lo que tampoco se pueden efectuar conclusiones acerca de la incidencia de las cargas eólicas.

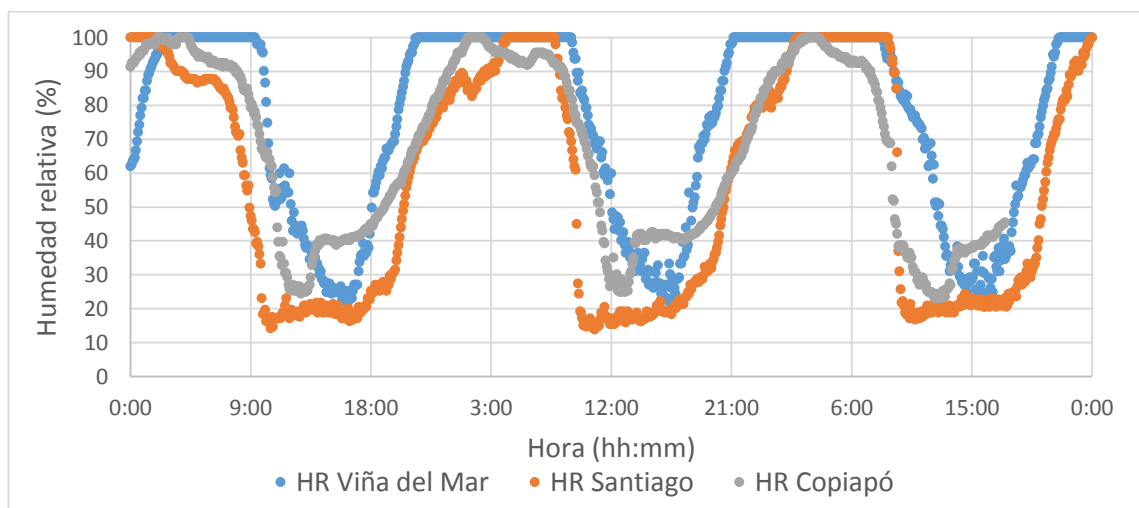


Figura 3.28: Comportamiento de humedad relativa en las tres zonas de medición.

### 3.2.7.2. Flujo de calor

En virtud del reducido distanciamiento entre las temperaturas implicadas en la obtención del flujo de calor, el potencial de enfriamiento (figura 3.29) es bastante bajo en comparación al observado en las otras zonas. Sin embargo, continúa siendo más eficiente el equipo expuesto al ambiente. Así, nuevamente la pantalla de viento es perjudicial para el proceso deseado.

En Copiapó, el máximo potencial de enfriamiento observado para el radiador expuesto y con pantalla de viento es de  $17 \text{ W/m}^2$  y  $14 \text{ W/m}^2$  respectivamente, con promedios respectivos de  $8 \text{ W/m}^2$  y  $7 \text{ W/m}^2$ .

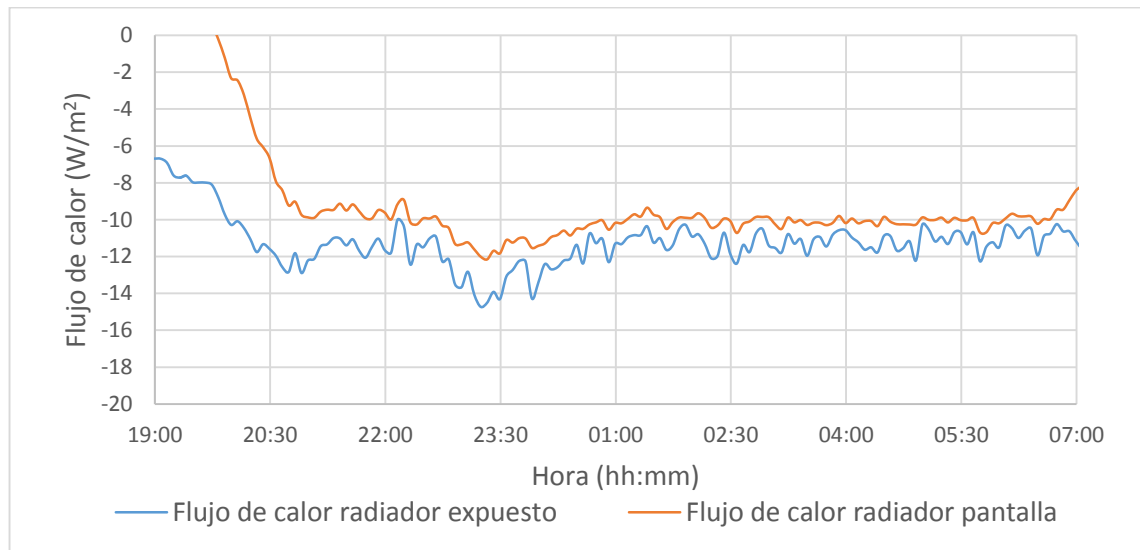


Figura 3.29: Flujo de calor convectivo entre radiadores y el ambiente.

### 3.2.7.3. Resumen

Lamentablemente, no conocer en detalle el sitio donde fueron instalados los equipos nos priva de efectuar conclusiones precisas sobre el reducido potencial observado. Lo que sí resulta evidente es que dentro de un protocolo de medición debe existir un sondeo previo de las instalaciones y zonas donde se registrarán datos.

Un factor que podría explicar el reducido potencial es la presencia de viento. Sin embargo, nuevamente se desconoce el real impacto de las cargas eólicas sobre la temperatura del

radiador, esta vez, por no obtener registro de mediciones por parte del anemómetro. Ello potencia la realización de un análisis específico de incidencia de viento sobre los radiadores.

Finalmente, los datos no se comportan de la manera esperada y se desconoce la razón. Así, la campaña de medición efectuada en Copiapó no es representativa para efectuar algún tipo de análisis.

### **3.2.8. Mediciones específicas**

Los análisis específicos para velocidad de viento y sombreado de los equipos serán presentados en detalle a continuación. Los registros de mediciones exhibidos en esta sección fueron realizados en el LER de la UTFSM.

#### **3.2.8.1. Análisis de velocidad de viento**

Puesto que las mediciones registradas que fueron expuestas en los incisos 3.2.5, 3.2.6 y 3.2.7 no permiten realizar conclusiones experimentales concretas acerca de la presencia de viento en la disminución de temperatura en el radiador respecto al ambiente, así como de la ventaja operacional que debiese implicar la pantalla de viento en zonas que presentan cargas eólicas, consideramos preciso ejecutar el presente análisis.

Para verificar la incidencia del impacto de cargas eólicas sobre los radiadores se aplicó una corriente de viento permanente sobre los equipos con un ventilador. El último se mantuvo en funcionamiento a lo largo de varios días, desde 17:00 a 8:30 horas aproximadamente. Las condiciones de operación de las distintas pruebas son las siguientes:

- Ambos radiadores expuestos al ambiente (sin pantalla de viento). Uno sometido a cargas de viento constantes y el otro interactuando pasivamente con el entorno (figura 3.30).
- Ambos radiadores sometidos a cargas constantes de viento. Uno expuesto al ambiente y el otro con pantalla de viento (figura 3.31). Se realizaron dos pruebas para verificar distintas velocidades.



Figura 3.30: Primera prueba con viento.



Figura 3.31: Segunda prueba con viento.

La figura 3.32 presenta el comportamiento de los equipos que se encuentran en la disposición observada en la figura 3.30. Se evidencia con la comparación de los radiadores la disminución en el potencial de refrigeración que produce el viento sobre el equipo afectado. Luego, las cargas eólicas impiden que se genere una diferencia comparativa entre las temperaturas de radiador y ambiente, observando caídas de temperaturas que rodean los 4 °C del equipo expuesto al viento respecto al otro.

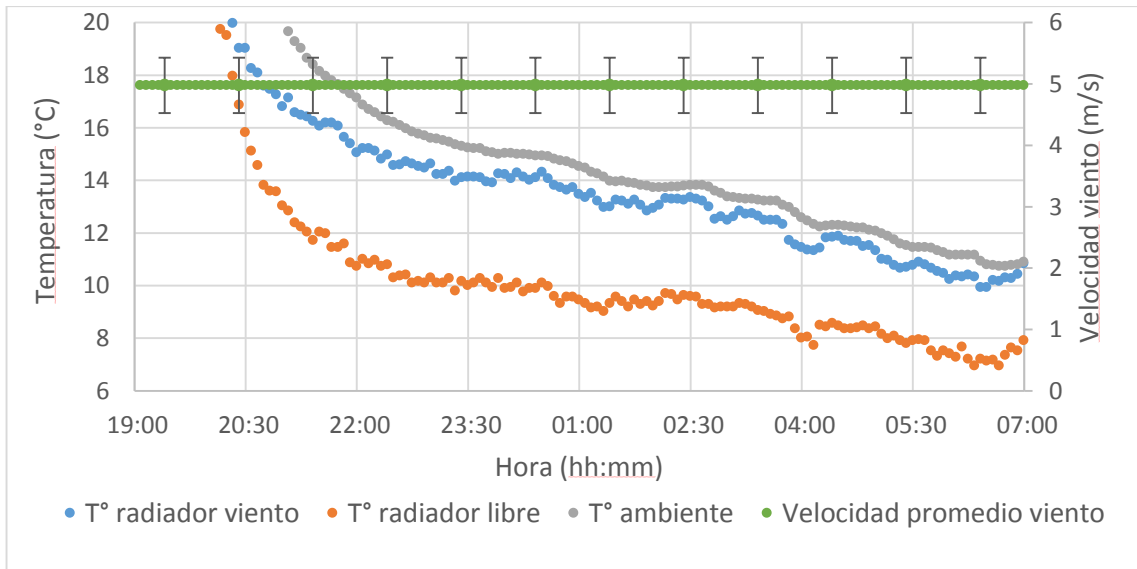


Figura 3.32: Comportamiento radiadores para configuración de figura 3.30.

Del segundo modo operacional (dispuesto en la figura 3.31) se obtienen resultados similares para las temperaturas de ambos radiadores durante el horario nocturno, como lo evidencian las figuras 3.33 y 3.35 (que presentan la misma escala de la figura 3.32), donde se registraron velocidades de viento promedio durante la noche de 3,4 m/s y 4,8 m/s respectivamente. El comportamiento para ambos radiadores es prácticamente el mismo en dicho horario. Observar detalladamente en las figuras 3.34 y 3.36 (ampliaciones) que los dos equipos son afectados negativamente por las cargas de viento sobre ellos. Luego, se destaca que la diferencia en la temperatura de los radiadores respecto a la temperatura ambiente es menor para el caso en que existe una mayor presencia de viento, por lo que se reafirma el rol negativo del impacto eólico en el proceso de enfriamiento pasivo.

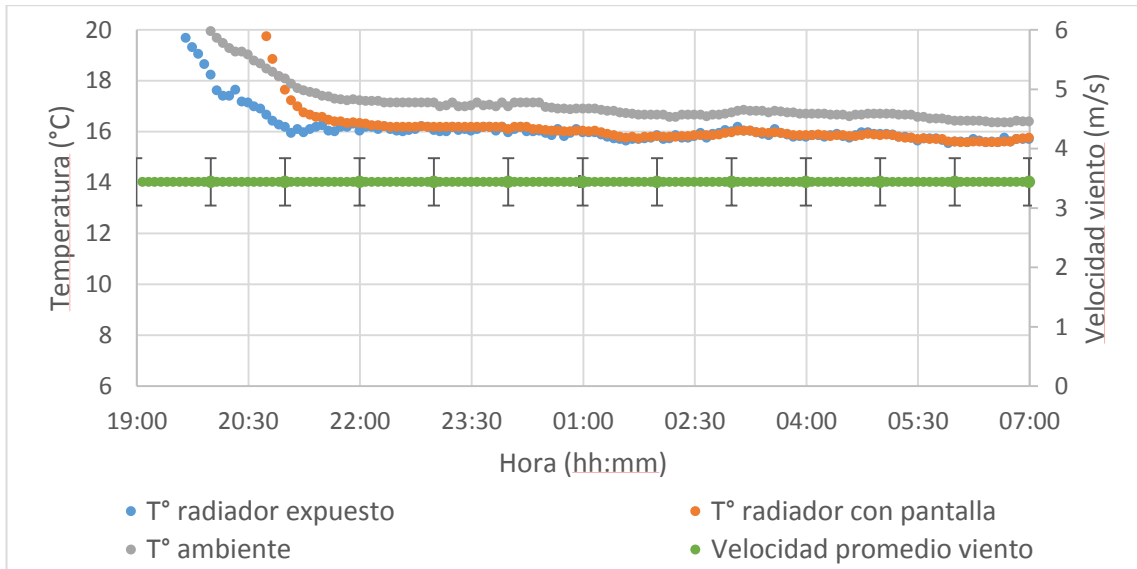


Figura 3.33: Comportamiento radiadores para configuración de figura 3.31.

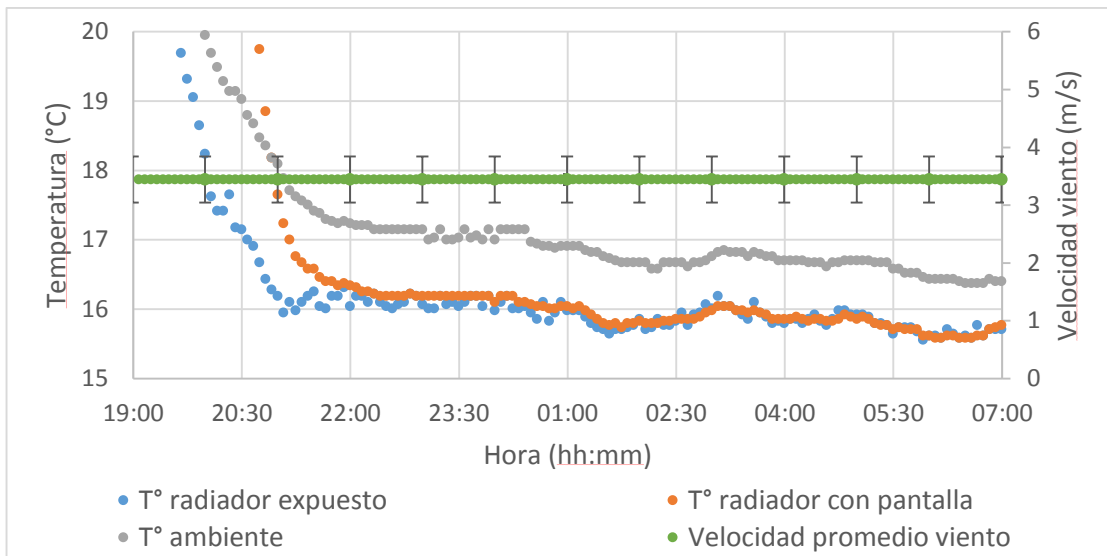


Figura 3.34: Comportamiento radiadores para configuración de figura 3.31.

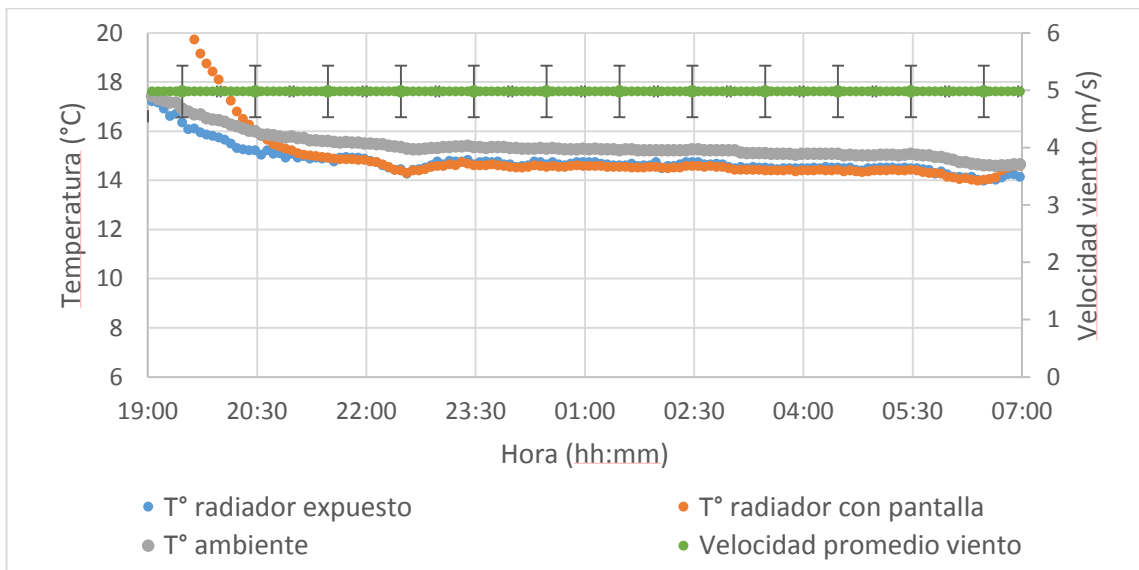


Figura 3.35: Comportamiento radiadores para configuración de figura 3.31.

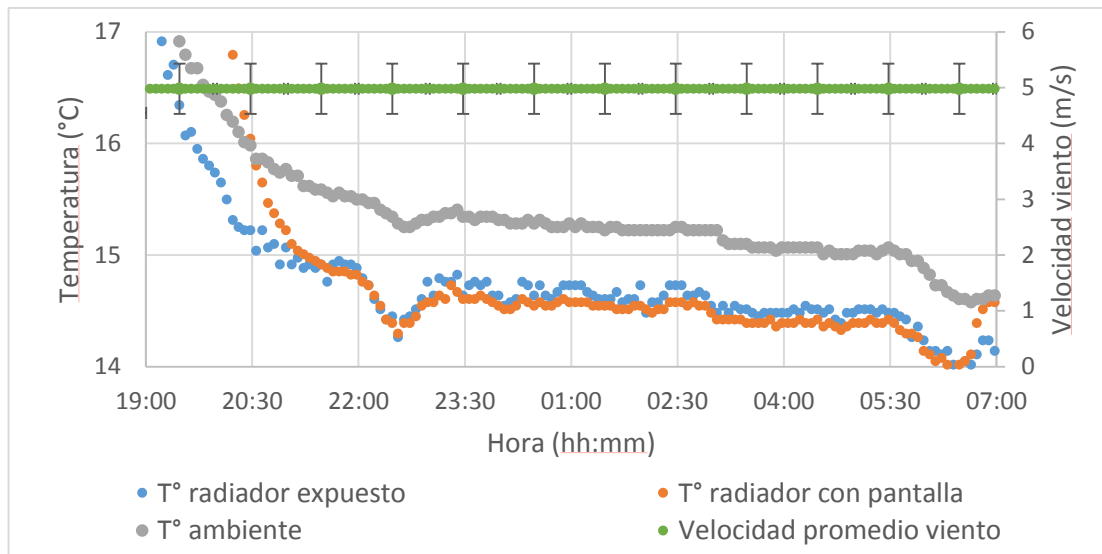


Figura 3.36: Comportamiento radiadores para configuración de figura 3.31.

Los resultados nos permiten concluir dos cosas. En primer lugar, resulta efectivo que el viento juega un rol negativo en el enfriamiento de los radiadores, impidiendo que la temperatura de los últimos se distancie comparativamente del ambiente. Segundo, la pantalla de viento no cumple su función, siendo un factor operacional que juega en contra para el enfriamiento del equipo por la radiación que refleja hacia la placa y no aportar a la aislación de las cargas eólicas sobre la última.

En función de las conclusiones mencionadas, es pertinente pensar en alternativas que permitan un aislamiento efectivo de los equipos contra las cargas eólicas, puesto que se espera que regiones que no han sido analizadas en el presente, cercanas a zonas desérticas del país, tengan un mayor potencial de enfriamiento respecto al ambiente de acuerdo a sus condiciones climáticas (altas temperaturas, climas despejados y secos). No obstante, la presencia de viento en ellas tiende a ser mayor, por tanto debe ser un factor operativo a considerar para la optimización del resultado esperado.

### 3.2.8.2. Análisis de sombreado

Para verificar el efecto que produce sombrear un radiador sobre el proceso de enfriamiento, se ubican ambos equipos de acuerdo a la disposición observada en la figura 3.37.



Figura 3.37: Configuración de radiadores para producir sombreado a uno de ellos.

El sombreado se produjo sobre uno de los radiadores durante el intervalo temporal comprendido entre las 16:00 y las 19:00 horas aproximadamente. Los resultados para la temperatura del equipo sombreado resultan bastante positivos en comparación al otro, que mantuvo el comportamiento típico observado a lo largo de todas las campañas de mediciones efectuadas.

La figura 3.38 presenta los datos registrados. Destacar la temperatura de enfriamiento obtenida en el horario recién mencionado por el radiador que recibe sombra. Además de adelantar el proceso de enfriamiento, se obtiene una temperatura máxima de  $24,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  de distanciamiento respecto al ambiente. No se considera el promedio, puesto que el intervalo temporal es bastante reducido. Tal como se mencionó a lo largo del presente, la reducción observada es debido a la baja humedad relativa presente al momento en que se ha sombreado el equipo.

Además, el potencial de enfriamiento del radiador respecto al ambiente asciende a un máximo observado de  $99\text{ W/m}^2$ .

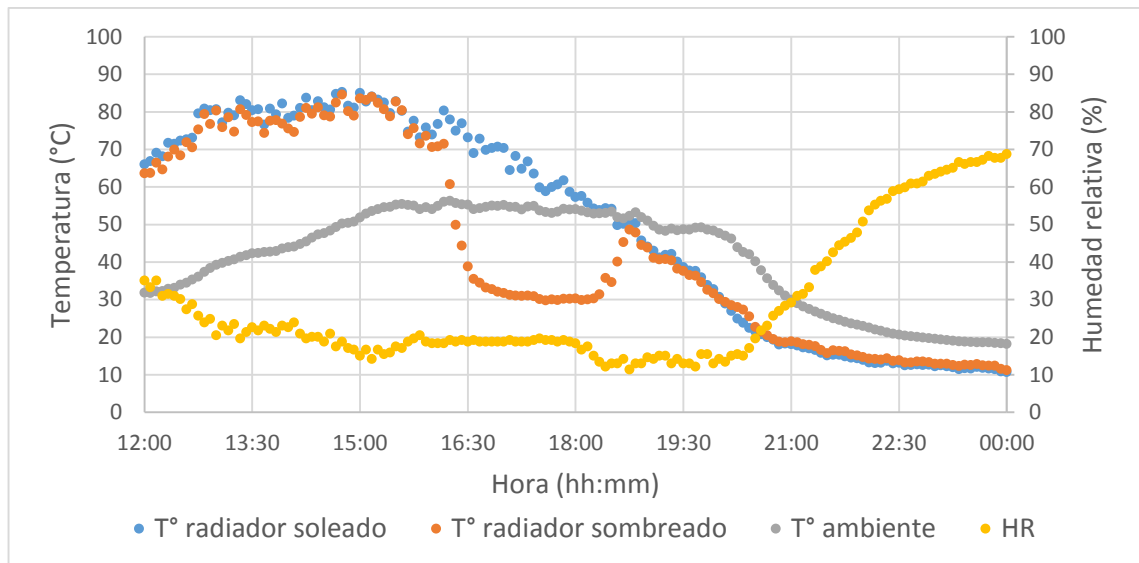


Figura 3.38: Comportamiento de radiadores para configuración expuesta en figura 3.37.

A primera vista, los últimos datos resultan alentadores, por lo que surgiría la discusión sobre crear sistemas de enfriamiento diurnos, que en primera instancia resultarían más eficientes si se logra la construcción de un prototipo aislado de la radiación solar. Además, se lograría entregar un mayor valor agregado a un equipo diurno frente a uno nocturno, debido a que podría inducir a la generación de aplicaciones de enfriamiento en horarios en que poseen mayor demanda los sistemas de acondicionamiento de espacios. Sin embargo, hay que detenerse a observar detalladamente el valor de temperatura ambiental, que alcanza valores que rondan los 55 °C. Claramente, este valor está afectado por la temperatura del radiador, por lo que, si bien existe una reducción de temperatura en el equipo sombreado, el potencial está alterado por este error de medición de temperatura ambiente.

#### 4. Conclusiones

En el presente trabajo se logran emular en buena medida los resultados presentados en las publicaciones correspondientes al estado del arte relacionado a la tecnología de enfriamiento por radiación nocturna y sus diferentes enfoques de aplicación. Lo anterior es consecuencia del correcto diseño y la adecuada optimización de las variables constructivas del radiador, realizada mediante la simulación señalada en el capítulo 2: “Diseño de experimento”.

Además, se determina teóricamente la incidencia de las diferentes variables ambientales sobre el equipo.

Se establece un procedimiento de construcción de los equipos, así como un protocolo de medición que incluye el detalle de las zonas geográficas donde se realizarán pruebas, las variables a registrar, los instrumentos a utilizar, y el error que conlleva el registro de las mediciones.

Respecto a los resultados obtenidos, se exhibe en gran medida la lógica esperada en cuanto al comportamiento de las mediciones. Experimentalmente, se destaca la importancia que presentan las siguientes condiciones, que harán más favorable a un sistema de enfriamiento pasivo:

- Aislación frente a cargas de viento, pues impiden que la temperatura de los radiadores se distancien eficientemente de la ambiental.
- Aislación a radiación solar para producir enfriamiento pasivo diurno, el cual podría resultar más potente frente al nocturno.
- Aprovechamiento de zonas con reducida humedad relativa, factor clave en la eficiencia de interacción radiativa entre el cielo y el radiador.
- Claridad de cielo, que pese a no tener certeza absoluta, se asocia en parte esta variable al menor potencial obtenido en Santiago respecto al esperado.

No se logra establecer una ventaja que distinga equipos con pantalla de viento frente a uno expuesto. Así, por el momento se desecha la opción de aislar las cargas eólicas de dicha forma. Sin embargo, algún material con un índice de transparencia mayor a la radiación infrarroja podría arrojar mejores resultados frente a los exhibidos en el presente informe.

Luego, se otorga valor positivo al presente estudio, pues logra establecer conclusiones claras, justificando, cuantificando y comparando sus resultados con publicaciones existentes y presentando una tendencia de resultados equivalentes. De todas formas, se espera que en Chile existan zonas con mayor potencia de enfriamiento a las analizadas en el presente, como sería el caso de sitios cordilleranos o desérticos del norte del país.

## **5. Perspectivas y mejoras operacionales**

De la experiencia adquirida a través del presente trabajo surgen ciertas perspectivas a desarrollar en el futuro. Entre las más destacables se espera poder efectuar mediciones en aquellas zonas cuyo potencial de enfriamiento promete, teóricamente, ser mayor que en las expuestas a lo largo del presente trabajo. También, es preciso elaborar un procedimiento que permita conocer con certeza las propiedades de los materiales comerciales implicados en la fabricación de los radiadores, con el fin de optimizar la fase constructiva de los equipos y obtener un proceso de enfriamiento de mayor eficiencia. Por último, se espera emprender en procedimientos de diseño, optimización y construcción de equipos donde se pueda generar alguna aplicación proveniente del enfriamiento pasivo, estudiando así, la viabilidad de que estos sistemas se constituyan como una fuente de energía renovable.

Respecto a las mejoras operacionales a tener en consideración si se desea replicar el procedimiento exhibido en este trabajo sería de gran aporte, para el análisis de resultados, una detallada descripción que permita conocer las condiciones del entorno donde estarán instalados los equipos para poseer antecedentes a la hora de analizar los datos y poder encontrar respuesta a eventuales comportamientos no esperados. Luego, en caso que los recursos lo permitan, resultaría interesante el empleo de una mayor cantidad de instrumentos de medición a fin de disminuir los errores en el registro de datos y acceder a un análisis de resultados con una confiabilidad superior.

## 6. Referencias

- [1] Ministerio de Energía. Gobierno de Chile. Energía 2050. Política Energética de Chile. Resumen [en línea]  
<[http://www.energia.gob.cl/sites/default/files/energia\\_2050\\_-\\_resumen\\_de\\_la\\_politica\\_energetica\\_de\\_chile.pdf](http://www.energia.gob.cl/sites/default/files/energia_2050_-_resumen_de_la_politica_energetica_de_chile.pdf)> [consultado: mayo 2017]
- [2] Sistemas activos y pasivos, la combinación más eficiente en la proyección de espacios por Verónica Ledesma, Alejandro Baeza, Alan Cabral, Eduardo Sánchez y César Ulises. Revista Mundo HVAC&R. Nov. 2015.
- [3] C. Armenta-Déu, T. Donaire, J. Hernando. (2001). Thermal analysis of a prototype to determine radiative cooling thermal balance. Grupo de Energía Solar y Facultades Físicas. Universidad Complutense, España.
- [4] G. Castellanos, J. Fournier y R. Valdivia. (1972). Enfriamiento de un cuerpo negro radiante en dirección del espacio en el desierto de Atacama, Chile. Informe n° 6. Ministerio de Obras Públicas y Transporte, Dirección General de Aguas, Hidrología y Departamento de Mecánica. Universidad de Chile.
- [5] J. Hollick. (2012). Nocturnal radiation cooling tests. Conserval Engineering Inc., 200 Wildcat Road, Toronto Ontario Canada.
- [6] Z. Chen, L. Zhu, A. Raman, S. Fan. (2016). Radiative cooling to deep sub-freezing temperatures through a 24-h day-night cycle. Nature communications.
- [7] M. Hu, G. Pei, L. Li, R. Zheng, J. Li, J. Ji. (2015). Theoretical and experimental study of spectral selectivity surface for both solar heating and radiative cooling. International Journal of Photoenergy.
- [8] Felipe Villalobos. Medición de enfriamiento por radiación nocturna de placa en diversas zonas del país con presentación de resultados empíricos y comparación con modelo en programa EES. Tesis (Ingeniería Civil Mecánica).Valparaíso. UTFSM, Departamento de Ingeniería Mecánica. 2018.

- [9] Juan Zanolli. Datos climatológicos de Chile para la elaboración de modelo Chile-SR. Tesis (Magíster en Ciencias de la Ingeniería). Santiago. PUC. Escuela de Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile. 2011. 126 h.
- [10] Red Agroclima. Informes regionales sobre velocidad del viento en Chile [en línea]. <<http://www.agroclima.cl/InformesRegionales/Region.aspx>> [consulta: octubre 2017]
- [11] Mathieu Rouaud. (2013). Probability, statistics and estimation. Propagation of uncertainties.
- [12] Manuel Martín Monroy. Comportamiento térmico de cerramientos soleados. Un modelo de simulación por diferencias finitas. Tesis (Doctorado en Arquitectura). Las Palmas de Gran Canaria. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Departamento de Construcción Arquitectónica. 1995.
- [13] Agromet. Ministerio de Agricultura. Gobierno de Chile. Informes meteorológicos de red agroclimática nacional [en línea]. <<http://www.agromet.inia.cl/estaciones.php>> [consulta: octubre 2017]