

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



# **“MODELACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE INSTRUMENTO DE MEDICIÓN DE TEMPERATURA DE CIELO”**

**GABRIEL ANTONIO CARVALLO VERGARA**

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

**PROFESOR GUÍA: PH.D RODRIGO BARRAZA VICENCIO.**

**PROFESOR CORREFERENTE: PH.D. JORGE CONTRERAS  
RODRÍGUEZ.**

**AGOSTO – 2018**



TITULO DE LA TESIS:

**MODELACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE INSTRUMENTO DE MEDICIÓN DE  
TEMPERATURA DE CIELO**

AUTOR:

**GABRIEL ANTONIO CARVALLO VERGARA**

TRABAJO DE TESIS, presentado en cumplimiento parcial de los requisitos para el  
Grado de Ingeniero Civil mecánico de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Dr. Rodrigo Barraza Vicencio. ....

Dr. Jorge Contreras Rodríguez.....

Santiago, Chile. Agosto de 2018

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, agradezco a mis padres, que con su constante apoyo y cariño han sido pilar fundamental en este proceso. A mi pareja Pía que en estos últimos cuatro años de carrera ha alegrado mis días y ha estado siempre junto a mí. A mi amigo José Schiappacasse, técnico electrónico sansano y amigo desde los 8 años, quien dedicó incontables horas a ayudarme en la parte electrónica de este trabajo. A los amigos que conocí en la universidad y crecieron conmigo. Agradecimientos especiales a los encargados del FabLab USM, quienes de manera desinteresada aportaron su tiempo en ayudar y pusieron a mi disposición sus equipos. Principalmente agradecer de ese equipo a Leonardo Cornejo, José Tomás Domínguez y Alexis Jara. A Miguel Bravo Valdés, técnico electrónico quien a pesar de no conocerme, tuvo la gentileza de aconsejar y aportar con sus conocimientos. A los apoyos académicos del taller de metal-mecánica del campus San Joaquín, principalmente Jaime Núñez y Claudio Aravena por su perfecto trabajo en procesar la placa de cobre en tiempo récord. A José Núñez, apoyo académico del laboratorio de termo-hidráulica del campus San Joaquín, por facilitar el uso del baño termostático y tener siempre buena disposición para aportar con este proyecto.

## RESUMEN

La temperatura de cielo es un concepto potencialmente muy útil en ingeniería pero aún no ha alcanzado reconocimiento masivo. Es un valor que cuantifica todo el complejo comportamiento de los gases de la atmósfera y otras fuentes de radiación electromagnética sobre un punto específico en la superficie terrestre. En simples palabras, equivale a la temperatura que debiera poseer un cuerpo negro que emite la misma energía que emite todo el cielo visible sobre una superficie horizontal definida.

Si bien durante el día la radiación incidente en la superficie de la tierra cubre gran parte del espectro electromagnético (a pesar de que disminuye su intensidad y que es filtrada en ciertos rangos de frecuencia al atravesar la atmósfera), durante la noche el rango de frecuencia de la radiación incidente es casi exclusivamente infrarrojo. Además, como es evidente, la intensidad de la radiación en la noche es sustancialmente menor. Por todo esto se puede asegurar que la temperatura de cielo durante la noche siempre es menor a la temperatura ambiente.

Veremos que el valor de la temperatura de cielo depende de diferentes factores ambientales. Por ejemplo, una mayor nubosidad hará aumentar la temperatura de cielo (disminuyendo el calor por radiación que una superficie podría emitir hacia el cielo) mientras que un cielo despejado la disminuirá (aumentando la emisión de calor por radiación desde la misma superficie).

Siempre que sea medida durante la noche, su valor será menor que la temperatura ambiente, pudiendo tomar valores entre  $5^{\circ}\text{C}$  menor, en un clima caluroso y húmedo, y aproximadamente  $30^{\circ}\text{C}$  por debajo de dicha temperatura, en un clima frío y seco [1].

El procedimiento para la elaboración del instrumento que determinará la temperatura de cielo es simple: se debe aislar térmicamente lo más posible una placa de cierto material para que disminuyan los efectos de la conducción y convección a valores lo más bajo posibles, esto se logra colocándola dentro de una caja plástica aislada con una capa de lana de vidrio, y además se debe colocar una fuente de calor conocida y constante dentro de ella. También se debe dejar esta placa expuesta al cielo con un orificio en la parte superior de la caja. Así hay certeza de que su único intercambio de energía al medio ambiente sea el calor recibido por esta fuente controlada, la radiación que recibe y emana de la placa y la convección con el aire que la rodea. Con esto se puede asegurar que los cambios de temperatura que experimente serán producto de las tres formas de intercambio de calor previamente mencionadas. Las mediciones se realizarán principalmente de noche y por lo tanto se puede prever que el cielo tendrá una energía por radiación menor que la de la placa caliente. Por ende, será dicho material el que emitirá la mayor cantidad de radiación al cielo y no viceversa. Luego la placa tendrá una temperatura menor a la que tendría en una zona cubierta.

Al conocer los resultados medidos, se podrá obtener empíricamente la temperatura de cielo.

## ABSTRACT

The sky temperature is a concept that could be very useful in engineering but it hasn't reached massive recognition yet. It is a value that quantifies the whole complex behavior of atmospheric gas and other sources of electromagnetic radiation reaching a specific place on the earth surface. In simple words, it equals the temperature a black body should have if it emitted the same energy that the whole visible sky emits on a defined horizontal surface.

The radiation during the day covers most of the spectrum (despite of being filtered by the atmosphere), but during the night the frequency range is completely infrared. Also, the intensity of the radiation at night is much lower. Because of this, it's certain that the night sky temperature is always lower than the ambient temperature.

We will see that the value of the sky temperature depends on different ambient values that can be measured. For example, a more cloudy sky means a higher sky temperature (decreasing the amount of radiation heat the surface emits to the sky) while a clear sky means a lower sky temperature (increasing the radiation heat emitted to the sky by the surface)

As long as it's measured during the night, its value will be lower than the ambient temperature, between  $5^{\circ}\text{C}$  lower, in a moist and hot weather, and  $30^{\circ}\text{C}$  lower than the ambient temperature in a cold and dry weather [1].

The process of constructing the instrument that will determine the sky temperature is simple: a metal plaque must be placed inside a box that will be mostly isolated from the outside, except for a circular hole on the top of it, facing the sky. This way, convection and conduction values will be low. Inside the plaque there is a constant heat source. So with a simple energy balance, considering convection, conduction and radiation we will know the

sky temperature of the place. The measurements will mostly be done at night so there is certain that the sky temperature will be lower than the ambient temperature.

# Índice De Contenidos

|      |                                                                      |    |
|------|----------------------------------------------------------------------|----|
| 1.   | Introducción .....                                                   | 1  |
| 2.   | Objetivos Propuestos.....                                            | 3  |
| 2.1. | Objetivos Generales .....                                            | 3  |
| 2.2. | Objetivos Específicos .....                                          | 3  |
| 3.   | Radiación Nocturna vs. Radiación Solar.....                          | 5  |
| 3.1. | Transferencia de Calor por Radiación .....                           | 5  |
| 3.2. | Radiación Solar .....                                                | 6  |
| 3.3. | Radiación Nocturna .....                                             | 7  |
| 4.   | Estado Del Arte .....                                                | 8  |
| 4.1. | Utilización de Enfriamiento Radiativo en la Historia.....            | 8  |
| 4.2. | Estimaciones de T. de Cielo Utilizando Correlaciones Numéricas ..... | 9  |
| 4.3. | Estado del Arte.....                                                 | 10 |
| 4.4. | Instrumentos de Medición de Temperatura de Cielo .....               | 10 |
| 4.5. | Enfriadores Radiativos.....                                          | 13 |
| 4.6. | Resumen.....                                                         | 15 |
| 5.   | Modelo Numérico .....                                                | 17 |
| 5.1. | Descripción General .....                                            | 17 |
| 5.2. | Detalle del Sistema .....                                            | 18 |
| 5.3. | Flujos de Energía.....                                               | 22 |
| 5.4. | Diagrama de Bloques .....                                            | 23 |

|        |                                                                |    |
|--------|----------------------------------------------------------------|----|
| 6.     | Construcción Del Instrumento .....                             | 24 |
| 6.1.   | Descripción General .....                                      | 24 |
| 6.2.   | Selección de Materiales .....                                  | 26 |
| 6.2.1. | Placa Emisora .....                                            | 26 |
| 6.2.2. | Sensores de Temperatura .....                                  | 28 |
| 6.2.3. | Caja Exterior .....                                            | 30 |
| 6.2.4. | Sensor Infrarrojo de Temperatura.....                          | 31 |
| 6.2.5. | Aislante de Caja .....                                         | 31 |
| 6.2.6. | Resistencias.....                                              | 32 |
| 6.2.7. | Sensor de Condiciones Ambientales.....                         | 33 |
| 6.2.8. | Fuente de Poder .....                                          | 33 |
| 6.2.9. | Medidores de Corriente y Tensión en Resistencias .....         | 33 |
| 6.3.   | Dimensionamiento .....                                         | 34 |
| 6.4.   | Tabla Resumen de Elementos.....                                | 36 |
| 7.     | Resultados .....                                               | 38 |
| 7.1.   | Placa de Cobre dentro de la Caja. ....                         | 38 |
| 7.2.   | Placa Emisora Expuesta al Ambiente.....                        | 44 |
| 7.3.   | Placa Emisora Expuesta al Ambiente con Papel Aluminizado ..... | 45 |
| 8.     | Conclusiones .....                                             | 48 |
| 9.     | Anexos.....                                                    | 52 |
| 10.    | Referencias .....                                              | 66 |

# 1. Introducción

Enfriar y mantener espacios a temperaturas bajo la temperatura ambiente es uno de los procesos ingenieriles más importantes en la actualidad. Ya sea para acondicionar un hogar, conservar alimentos u otro propósito, la demanda por enfriamiento sólo ha aumentado en las últimas décadas y no se ve una disminución en el horizonte, sobre todo considerando los efectos del calentamiento global (olas de calor intensas, incendios cada vez más frecuentes, derretimiento del hielo polar, etc) [2]. Si al cambio climático se le suma el explosivo avance de la urbanización y el incesante incremento del comercio de alimentos (muchos de los cuales deben ser transportados y almacenados en frío), se hace necesario encontrar formas de enfriamiento alternativas a las tradicionales (principalmente combustibles fósiles) que sean más amigables con el medio ambiente. De lo contrario, se corre peligro de no cumplir las metas comprometidas en la cumbre COP21 en París el año 2015 [3].

Enfriamiento pasivo consiste en disminuir la temperatura de un cuerpo o lugar aprovechando fenómenos presentes en la naturaleza, agregando poco o nada de energía al sistema. Algunos ejemplos son el **enfriamiento evaporativo**, donde se aprovecha la evaporación como disipador de calor; el **enfriamiento al suelo**, en el que se transporta el calor de una edificación hasta pocos metros por debajo del suelo debido a que la temperatura bajo tierra es siempre menor a la temperatura ambiente; y por último, el **enfriamiento radiativo**, en el que se aprovecha la transferencia de calor por radiación hacia cuerpos de menor temperatura.

Dentro del enfriamiento radiativo, nos concentraremos en la emisión de radiación de un cuerpo hacia el cielo nocturno. La radiación que llega a la superficie terrestre durante la noche

es evidentemente menos intensa que la que llega en el día (además de tener una longitud de onda mayor, principalmente en el rango infrarrojo), siendo incluso menor que la radiación emitida desde los cuerpos a temperatura ambiente hacia el cielo. Se puede concluir a partir de esto que la transferencia neta de calor por radiación entre el cielo nocturno y un objeto en la superficie terrestre a temperatura ambiente o mayor será en el sentido del cuerpo hacia el cielo y no viceversa (ver Ilustración 1). Existen registros de pueblos antiguos que aprovecharon este fenómeno para enfriar agua durante la noche e incluso fabricar hielo [4].

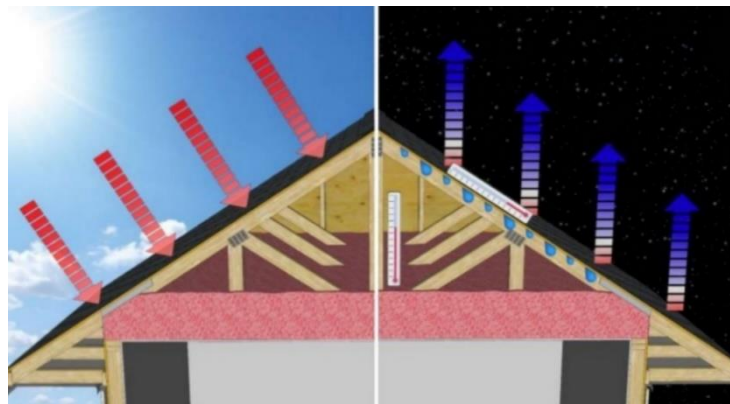


*Ilustración 1. El techo de una edificación recibe radiación durante el día y la emite durante la noche [5].*

## **2. Objetivos Propuestos**

### **2.1. Objetivos Generales**

La temperatura de cielo es la idealización como cuerpo negro de una superficie que emite la misma energía que emite todo el cielo visible incluyendo los efectos de la composición de los gases de la atmósfera. La temperatura de cielo es menor que la temperatura ambiente permitiendo un enfriamiento de superficies durante la noche. La cuantificación de la temperatura de cielo permite evaluar el potencial de alternativas del enfriamiento radiativo en distintas zonas y potenciales aplicaciones.

La temperatura de cielo depende en gran parte de los factores ambientales del lugar y momento en que se realiza el estudio, es por esto se propone diseñar y construir un instrumento simple que por medio de equilibrio térmico permita determinar la temperatura de cielo. También se debe poner a prueba dicho instrumento y realizar una serie de mediciones para comprobar su correcto funcionamiento.

### **2.2. Objetivos Específicos**

- Revisar el estado del arte relacionado con técnicas de medición de temperatura de cielo.
- Revisar el estado del arte relacionado con correlaciones numéricas que estimen la temperatura de cielo en base a otros parámetros.
- Diseñar el instrumento utilizando un modelo numérico que simule el experimento mediante el software EES y así analizar los diferentes factores ambientales y constructivos que son más relevantes para realizar una medición precisa.
- Seleccionar los instrumentos y sistemas de adquisición de datos que permitan una medición precisa y automática de datos.

- Construir un instrumento que permita obtener la temperatura de cielo de manera empírica.
- Medir temperatura de cielo por un período acotado de tiempo.
- Comparar los datos experimentales con correlaciones numéricas.

## 3. Radiación Nocturna vs. Radiación Solar

### 3.1. Transferencia de Calor por Radiación

El calor se puede transmitir de tres maneras, por convección, conducción o radiación. La convección se produce en un fluido en el que hay zonas con diferente temperatura mientras que la conducción se produce cuando hay dos cuerpos en contacto a distinta temperatura. Por último, el calor también se puede transmitir mediante radiación electromagnética emitida por un cuerpo cuya temperatura es mayor a 0 [K] (ver Ilustración 2)

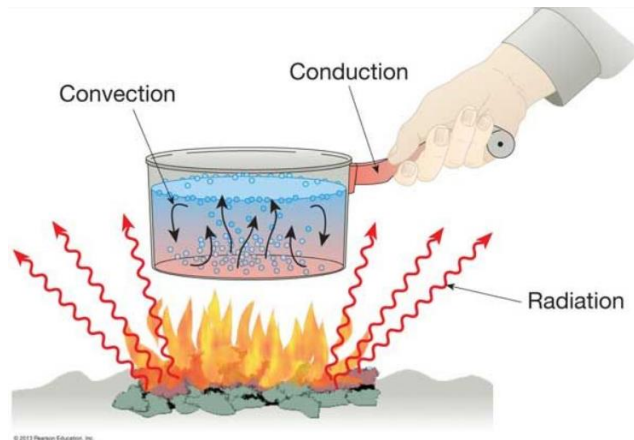


*Ilustración 2. Tres formas de transferencia de calor. [6]*

La cantidad de radiación emitida por una superficie fue definida por los físicos austríacos Jozef Stefan y Ludwig Boltzmann en 1884. Esta ley indica que la energía en forma de radiación térmica que emana de una superficie es proporcional a su temperatura absoluta elevada a la cuarta potencia. También considera la tendencia que cada superficie tiene a emitir su energía. Esta tendencia se llama emisividad y puede tomar valores entre 0 y 1. Si una superficie tiene emisividad igual a 1 se le denomina cuerpo negro. La Ley de Stefan-Boltzmann se expresa a continuación:

$$Q_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

*Ecuación 1*

Donde:

- $\varepsilon$ : *Emisividad* [–]
- $\sigma$ : *Constante de Stefan – Boltzmann*  $\approx 5,67 \cdot 10^{-8} \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right]$
- $T$ : *Temperatura de la superficie* [K]

### 3.2. Radiación Solar

Radiación solar se define como la energía proveniente del sol en forma de ondas electromagnéticas. La cantidad de radiación incidente sobre una superficie de manera instantánea se denomina irradiancia y la unidad de medida para ella es  $W/m^2$ . Esto también es aplicable a la radiación nocturna (o cualquier forma de radiación térmica), por lo que será útil más adelante.

La cantidad de energía que llega a la tierra desde el sol se puede considerar siempre constante y es conocida como Constante Solar (*GCS*) y su valor es aproximadamente  $1367 [W/m^2]$  [6]. Sin embargo, ésta es filtrada por la atmósfera y la cantidad de radiación que sí llega a la superficie es menor, superando los  $1.000 [W/m^2]$  en condiciones óptimas [7].

### 3.3. Radiación Nocturna

Por otro lado, durante la noche la cantidad de radiación incidente en la superficie terrestre es sólo una pequeña fracción de lo que es en el día. Esta radiación es emitida en su mayor parte por los gases atmosféricos y principalmente en los primeros 800 a 1600 metros sobre la superficie terrestre, zona donde se genera alrededor del 90% de la radiación [8]. Se podría pensar que esta radiación es nula o cercana a cero ya que no se puede apreciar con la vista, pero se debe considerar que la radiación de cielo durante la noche es infrarroja, la cual transporta menos energía que la radiación visible y notablemente menos energía que la ultravioleta. A pesar de esto, **sí tiene un efecto en la temperatura de los objetos expuestos al cielo nocturno**. La radiación efectiva que pierde una superficie en estas condiciones se puede expresar como la diferencia entre la radiación total emitida por dicha superficie y la radiación total incidente sobre ella.

El instrumento ideal para medir la radiación en este rango es el pirgeómetro, el cual puede percibir ondas entre 4 y 40  $[\mu m]$  aproximadamente y su alta sensibilidad permite medir la radiación nocturna sin problemas (Ilustración 3). Diversas mediciones realizadas en la noche con este instrumento varían entre los 200 y 300  $[W/m^2]$ , mientras que durante el día, la radiación aumenta a 700  $[W/m^2]$  con pobres condiciones ambientales y puede fácilmente superar los 1000  $[W/m^2]$  con condiciones ideales.



Ilustración 3. Pirgeómetro Kip & Zonen CGR3. [9]

## 4. Estado Del Arte

### 4.1. Utilización de Enfriamiento Radiativo en la Historia

Los primeros registros de la utilización de enfriamiento radiativo al cielo datan del año 900 en el antiguo Irán. Debido a sus condiciones tan extremas de temperatura, esta cultura debió ingeniárselas para generar frío sin el apoyo de la tecnología moderna. Uno de sus recursos era construir sus casas con hondos sótanos ya que la temperatura bajo tierra es en general menor (similar al “enfriamiento al suelo” descrito previamente). También, y lo que más nos interesa, es que durante las noches de invierno colocaban agua en piscinas de adobe para que se disminuyera su temperatura mediante enfriamiento radiativo. Haciendo esto podían generar hielo incluso con una temperatura ambiente varios grados mayor a la temperatura de congelación. Luego, en la madrugada se retiraba el agua fría (o hielo) y se transportaba a un tanque de almacenamiento. Todas estas estructuras eran de adobe grueso para disminuir las pérdidas de calor [4]. Este sistema se dejó de utilizar para consumo humano por motivos de salud pero se continuó utilizando para propósitos de enfriamiento (ver Ilustración 4).

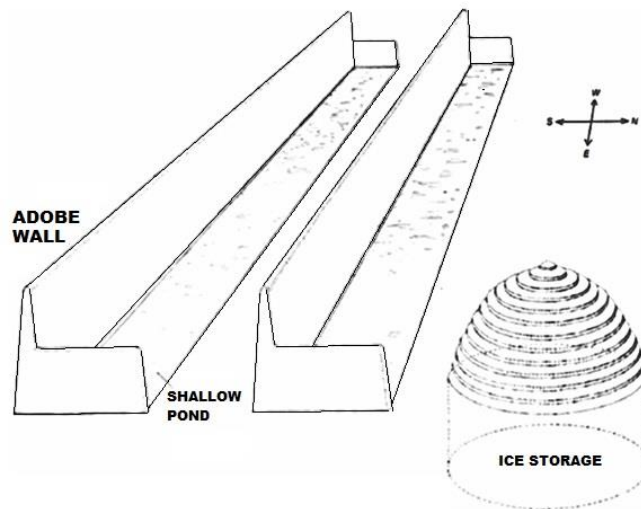


Ilustración 4. Sistema de enfriamiento de agua del antiguo Irán. [4]

## 4.2. Estimaciones de Temperatura de Cielo Utilizando Correlaciones Numéricas

Uno de los primeros pasos de este proyecto fue encontrar correlaciones numéricas que relacionaran la temperatura de cielo con factores ambientales. Distintos investigadores han dedicado tiempo a obtener una fórmula para desarrollar modelos capaces de predecir la temperatura de cielo.

Las primeras propuestas datan incluso desde la década de 1930, lo cual nos demuestra que este concepto lleva bastante tiempo siendo estudiado. Se muestran a continuación distintas correlaciones propuestas, terminando por las más aceptadas.

| $T_s =$                                                                                                                                                                             | Autor                 | Año  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|------|
| $T_{amb}$                                                                                                                                                                           | Dreyfus*              | 1960 |
| $0,0552 \cdot T_{amb}^{1,5}$                                                                                                                                                        | Swinbank              | 1963 |
| $T_{amb} - 6$                                                                                                                                                                       | Whillier*             | 1967 |
| $0,037536 \cdot T_{amb}^{1,5} + 0,32 \cdot T_{amb}$                                                                                                                                 | Fuentes*              | 1987 |
| $94 + 12,6 \cdot \ln(P_v) - 13K_t + 0,341 \cdot T_{amb}$                                                                                                                            | Aubinet*              | 1994 |
| $T_{amb} \left[ 0,711 + 0,56 \left( \frac{T_{dp}}{100} \right) + 0,73 \left( \frac{T_{dp}}{100} \right)^2 + 0,013 \cdot \cos \left( \frac{2\pi \cdot t}{24} \right) \right]^{0,25}$ | Argiriou, Santamouris | 1993 |
| $T_{amb} + 0,69 \cdot T_{dp} - 18$                                                                                                                                                  | Frigerio, Busano      | 2006 |
| $T_{amb} \cdot [0,711 + 0,0056 \cdot T_{dp} + 0,000073 \cdot T_{dp}^2 + 0,013 \cdot \cos(15 \cdot t)]^{1/4}$                                                                        | Berdahl, Martin       | 1984 |

Tabla 1. Unidades de temperatura en Kelvin y de presión en milibar. [10].  $P_v$ : Presión de vapor,  $K_t$ : Índice de claridad de cielo;  $t$ : Hora del día;  $T_{dp}$ : Temperatura de punto de rocío. \*Sólo válida en cielos nublados.

### **4.3. Estado del Arte**

Como lo indica la Ley de Stefan Boltzman (Ecuación 1), una superficie con mayor emisividad emite más radiación que una con menor emisividad a la misma temperatura. Es por esto que para optimizar un sistema de enfriamiento radiativo se debe contar con una superficie compuesta de un material con la mayor emisividad posible. También se debe considerar que esta es una propiedad que varía según la temperatura del material y según la longitud de onda de la radiación emitida.

Puesto que el rango de longitud de onda en el que se transfiere energía hacia el cielo es entre 8 y 14  $[\mu m]$  [11], el material ideal debe tener una alta emisividad en dicha ventana del espectro, sin importar si ésta disminuye en otras longitudes de onda. Es por esto que se han estudiado formas de mejorar la emisividad de las superficies en dicho rango y así optimizar el enfriamiento hacia el cielo.

### **4.4. Instrumentos de Medición de Temperatura de Cielo**

Se han construido previamente dispositivos cuya finalidad es la obtención de la temperatura de cielo. Ya desde los años 80 se ha intentado mediante instrumentación obtener este valor. Se analizan los avances más importantes en esta sección.

En el año 1981, en Victoria, Australia, se desarrolló un dispositivo con una placa plana pintada de blanco (alta emisividad) suspendida sobre una superficie negra bien pulida (alta reflectividad) frente a la boca de un tubo que impulsa aire gracias a un ventilador dentro de él. Mediante un balance energético se obtiene la temperatura de cielo.

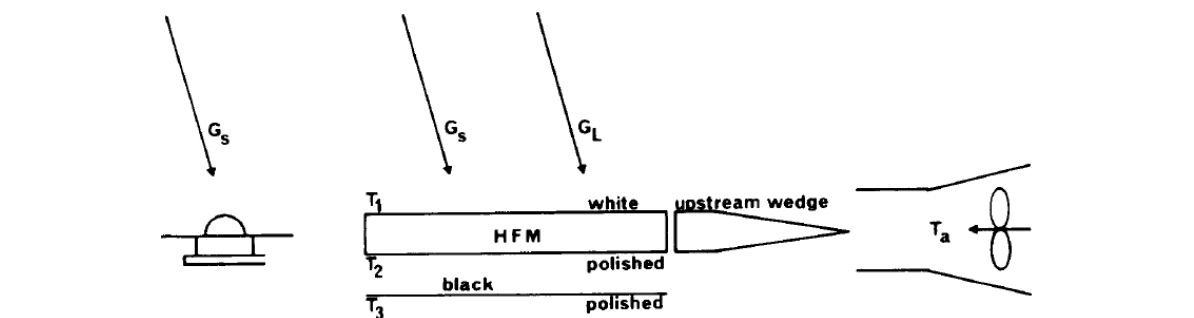


*Ilustración 5. Esquema de sensor de temperatura de cielo desarrollado en 1981 en Australia.*

Se ha utilizado también, en ámbitos tanto de aplicación científica como industrial (agricultura u otros), un sensor sencillo de temperatura que capta radiación infrarroja. Si éste se apunta hacia el cielo, mide la temperatura de cielo a grandes rasgos. Si bien no es un dispositivo de gran precisión, es bastante útil para reconocer si el cielo se encuentra despejado o nublado (la temperatura de cielo aumenta notoriamente en presencia de nubes). Incluso se realizó una publicación en la revista científica “Energy” destacando la utilidad de este dispositivo como alternativa de bajo costo con respecto a un pirgeómetro y se muestra una comparación de las mediciones de ambos dispositivos [13]. El mismo sensor infrarrojo se integra al sistema construido en el actual proyecto y se registran sus mediciones para utilizar como referencia en el análisis de resultados.

Incluso, se puede utilizar un sensor infrarrojo para detectar la altura de las nubes, entre otras condiciones ambientales si se complementa con otras mediciones, como se realizó el año 2006 en el Laboratorio Nacional Pacific Northwest en Richland, Estados Unidos, obteniendo precisos resultados de posición y características de las nubes. La ventaja de dicho sistema es que se complementa con datos recolectados por satélites [14].

Por supuesto, existe el dispositivo mencionado anteriormente, el pirgeómetro, el cual puede medir temperatura de cielo a partir de la radiación incidente de manera precisa. El principal problema para esto es su alto costo de adquisición. Los dispositivos como el que se va a construir en este proyecto o el construido en Australia el año 1981 buscan obtener este valor con una alta precisión sin tener que invertir tanto dinero.

#### 4.5. Enfriadores Radiativos

Aprovechando el fenómeno de radiación nocturna hacia el cielo, se han desarrollado dispositivos de enfriamiento radiativo y experimentos para mejorar su eficiencia en décadas recientes. Se resumen a continuación los más destacados.

En los últimos años, se ha estado investigando y experimentando en China con dispositivos que funcionan como calefactores de fuente solar y como enfriadores radiativos según se requiera. Esto se puede lograr gracias a que ambos sistemas son similares en su forma y por lo tanto, con ligeras adaptaciones se puede lograr un dispositivo que funcione para los dos propósitos. Esta investigación se publicó el año 2014 en la ciudad de Tianjín, donde fue probado el dispositivo para acondicionar habitaciones en las noches de verano y calefaccionarlas en los días de invierno. El dispositivo cubre una superficie de  $2\text{ m}^2$  y los resultados son: emisión de calor por radiación promedio durante la noche de  $87\text{ [W/m}^2\text{]}$ , logrando una disminución de temperatura del aire de hasta  $4^\circ\text{C}$  en comparación con la temperatura ambiente [15], si bien no es una gran diferencia, es un buen primer paso.

Un dispositivo similar (de doble función) fue optimizado mejorando la superficie del mismo, también en China. La publicación [16] concluye que el tereftalato de polietileno (TPET) fue el mejor material entre los probados, ya que si bien no llega a tener la eficiencia de un calefactor ni la misma eficiencia de un enfriador radiativo, su eficiencia global lo hace una buena alternativa si se quiere construir un solo dispositivo para ambos propósitos.

Experimentos se han realizado en los que se aplican distintas aleaciones de silicio sobre placas metálicas para observar el aumento de emisividad en el rango en que más radiación se emite a temperatura ambiente ( $8\text{-}14\text{ }\mu\text{m}$ ). Publicaciones que datan del año 1980 compararon distintos compuestos y aplicando películas de diferentes grosores sobre el metal, obteniendo

siempre mayor emisividad y menor reflectividad que las obtenidas sin los recubrimientos (recordemos que en un cuerpo no transparente como el metal, la suma entre emisividad ( $\epsilon$ ) y reflectividad ( $\rho$ ) es la unidad ya que su transmisividad ( $\tau$ ) es nula, como se observa en la Ecuación 7 en Anexos) (Ver Ilustración 22 en la sección Anexos) [17, 18, 19]. Se han probado también películas de óxido de magnesio de distintos grosores [20].

Puesto que en particular el instrumento de este proyecto no busca maximizar la radiación emitida sino estimar la radiación incidente, se utiliza un material de emisividad conocida aunque no necesariamente alta. El material escogido en esta ocasión es cobre.

Otro recurso que se ha estudiado es utilizar gas entre la placa emisora metálica y el vidrio cobertor. Se han estudiado gases que particularmente tienen alta emisividad en la ventana de radiación de 8 a 14  $[\mu m]$ . Un buen resumen de estas investigaciones fue publicado el año 1984 [21] donde concluyen que principalmente el amoníaco ( $NH_3$ ) y también una mezcla de etileno con óxido de etileno ( $C_2H_4 + C_2H_4O$ ) son los gases más eficientes para esta aplicación (ver Ilustración 20 e Ilustración 21 en Anexos).

Cabe destacar también el experimento realizado en 1971 en el desierto de Atacama, en el norte de Chile y publicado en marzo de 1972 por los científicos A. Castellanos, J. Fournier y R. Valdivia [22]. En dicho experimento, se instaló un piranómetro modificado para medir radiación infrarroja dentro de un cubo cónico cubierto con polietileno para aislar el aire interior sin interrumpir el paso de la radiación. Las mediciones se realizaron en noviembre de ese año y se obtuvieron valores de radiación de cielo nocturno de entre 80 y 140  $[W/m^2]$ . Sin embargo, la parte principal de la experiencia fue construir un sistema similar pero con una placa radiante que casi se comporta como cuerpo negro ( $\epsilon=0,98$ ) en vez del piranómetro. Se colocó una termocúpla en la placa y se registró su temperatura, llegando a obtener valores de temperatura de cielo de hasta  $40^\circ C$  por debajo de la temperatura ambiente con un valor

promedio de  $25^{\circ}\text{C}$  de diferencia durante la noche. Valores impresionantemente altos. Gracias a estos inéditos resultados, el estudio fue destacado por la revista “Journal of Applied Physics” en su edición de Junio del año 1981 [18]. Sin embargo, a pesar de los promisorios resultados y de los buenos comentarios en dicho medio internacional, no existe registro de que se haya continuado con la investigación.

También, en tiempos más recientes, se llevaron a cabo una serie de experimentos en Argentina, en la Universidad Nacional de Salta, ubicada en dicha ciudad y conducidas principalmente por Erico Frigerio entre los años 1999 y 2012. Se realizaron estudios de temperatura de cielo y la relación que guarda esta variable con la humedad relativa, con la altura y con la nubosidad y también se modeló y construyó un sistema de enfriamiento radiativo para enfriar agua a partir de un panel solar térmico de placas planas [23, 24, 25, 26, 27, 28].

Una de las conclusiones que publicó Frigerio es que las correlaciones para calcular la temperatura de cielo no son de confiar y se debe por lo tanto experimentar en cada lugar y momento en particular. Irónicamente, esto lo declaró después de haber publicado en un estudio anterior una fórmula para obtener esta temperatura a partir de mediciones ambientales. Esta correlación se puede observar en la Tabla 1.

#### **4.6. Resumen**

Se han escogido los casos de enfriamiento radiativo y de obtención de temperatura de cielo más importantes que se han observado a nivel mundial tanto en tiempos recientes como algunos de hace algunas décadas. A raíz de todos estos ejemplos, se puede concluir que existe un interés de la comunidad científica en avanzar en la investigación e implementación del enfriamiento radiativo tanto para disminuir costos como para reducir el impacto ambiental

del hombre. Gracias a los buenos resultados que se han obtenido en general tanto en las simulaciones numéricas y análisis teóricos como las experimentaciones, se puede prever un aumento sustancial de investigación en este tema en los próximos años e incluso se podrían comenzar a considerar como sistema complementario de enfriamiento en la construcción de edificaciones nuevas.

Por otro lado, si observamos la historia reciente y consideramos el tiempo que ha demorado la energía solar fotovoltaica y solar térmica en alcanzar masividad, cabe la opción pesimista de que la explosión del enfriamiento radiativo demore varias décadas más en suceder.

Es muy interesante y cabe destacar el trabajo ya mencionado en China, donde se han realizado simulaciones y prototipos de sistemas mixtos con enfriamiento radiativo en la noche y calentamiento solar en el día.

## 5. Modelo Numérico

### 5.1. Descripción General

Se realiza una simulación del instrumento en el programa “Engineering Equation Solver (EES)”. Este software es un solucionador de ecuaciones, incluyendo ecuaciones no lineales y también diferenciales entre otras aplicaciones. Una de sus ventajas es la gran base de datos con la que cuenta y las facilidades que existen para trabajar con ella, esto simplifica y agiliza el flujo de trabajo y también hace que los resultados sean más precisos.

El código realizado es relativamente sencillo. Se definen los factores ambientales que influyen en el sistema, como la temperatura ambiente, humedad relativa, presión ambiental, y se definen también las dimensiones y materiales de todas las partes del sistema. Gracias a la base de datos del software, se puede obtener la mayoría de la información restante a partir de los datos ya ingresados. Por ejemplo, la temperatura de punto de rocío la entrega el software a partir de la temperatura ambiente, la humedad relativa y la presión atmosférica.

Se define también la entrada de calor desde los calentadores eléctricos, las pérdidas por conducción, la interacción por radiación entre superficies y entre superficies y el exterior y por último, se realizan dos balances de energía; el primero alrededor de la placa y el último balance considera la interacción entre la caja y el medio ambiente. Con estos balances podemos encontrar la temperatura de cielo. También en el código se calcula la temperatura de cielo utilizando dos correlaciones de las mencionadas anteriormente en la Tabla 1 para compararlas con el resultado obtenido. Y, por último, se realiza un análisis de sensibilidad en el mismo software para observar la influencia que tiene cada variable en el resultado final. Estos valores se observan en la Ilustración 23 donde se aprecia que la precisión del resultado

es de  $1,69^{\circ}\text{C}$  y el valor más influyente en el error relativo es la temperatura ambiente, en parte por su alta tolerancia (los detalles de cada sensor se verán con detalle en el siguiente capítulo).

## 5.2. Detalle del Sistema

Si analizamos el sistema en el software EES, se comienza definiendo la presión atmosférica según la altura a la que se realizan las mediciones ( $94,99 \text{ [KPa]}$ ) y se crea una tabla paramétrica en el software para ingresar los datos medidos cada noche, los valores medidos son cinco: humedad relativa, temperatura ambiente, temperatura de placa y tensión y corriente de entrada a las resistencias. Se realiza una medición por minuto. Se calcula la potencia que ingresa a las resistencias a partir de la tensión y corriente, obteniendo siempre alrededor de  $11 \text{ [W]}$  (Ecuación 2) y puesto que las resistencias se encuentran totalmente insertas en la placa, toda esta energía se traspasa a ella mediante conducción. Se utiliza la herramienta de EES que calcula la temperatura de punto de rocío a partir de datos ya conocidos (temperatura ambiente, humedad relativa y presión). Esta función utiliza las relaciones dadas en el libro "Formulations for the Thermodynamic Properties of the Saturated Phases of  $\text{H}_2\text{O}$ " de Hyland & Wexler, publicado el año 1983. Se definen después las dimensiones del sistema, las que se verán detalle en el siguiente capítulo y se indican también las propiedades térmicas; conductividad y emisividad.

$$Q_{in} = V_{in} \cdot I_{in} \approx 11 \text{ [W]}$$

*Ecuación 2*

Una parte importante en este modelo son los factores de forma de todos los elementos involucrados en el sistema. Puesto que se está analizando con mayor atención la transferencia de calor por radiación, el factor de forma de cada superficie en relación a las superficies que la rodean es de gran importancia. Afortunadamente, el software EES cuenta con una

herramienta que permite obtener dicho factor ingresando las dimensiones de las superficies y su disposición relativa utilizando las relaciones presentes en la sección 10.3.2 del libro “Transferencia de Calor” de Nellis & Klein, publicado el año 2009. Se obtienen así los factores de forma de cada cara de la placa con respecto a cada una de las caras interiores de la caja y los factores de forma de cada cara interior de la caja con respecto a las otras caras interiores. Luego, se definen todas las ecuaciones de transferencia de calor por radiación del sistema utilizando la ley de Stefan-Boltzmann y los factores de forma de cada superficie. Se expresa a modo de ejemplo en la Ecuación 3 la radiación emitida desde una superficie 1 hacia una superficie 2 con un factor de forma  $F_{1\rightarrow 2}$ :

$$Q_{rad,s1\rightarrow s2} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot F_{1\rightarrow 2} \cdot (T_{s1}^4 - T_{s2}^4)$$

*Ecuación 3*

Luego de realizar las mediciones, se observa que la temperatura de placa varía entre los 325 [K] y los 330 [K] y el calor por radiación total emitido por ésta varía entre los 3,9 [W] y los 4,5 [W]. La superficie total de la placa es de 0,02558 [m<sup>2</sup>] como se aprecia en la Ilustración 24.

Se considera también la convección libre alrededor de la placa. El software EES también cuenta con una herramienta para obtener el coeficiente de convección libre de cada cara de la placa utilizando las fórmulas propuestas también en el libro “Transferencia de Calor” de Nellis & Klein en la sección 6.2.2. Con estos valores se plantean las ecuaciones de transferencia de calor por convección de la placa, como lo indica la Ecuación 4, donde “ $h$ ” es el coeficiente de convección libre de una cara, “ $A$ ” es el área de dicha cara, “ $T_p$ ” es la temperatura de la placa y “ $T_{aire}$ ” es la temperatura del aire:

$$Q_{conv} = h \cdot A \cdot (T_p - T_{aire})$$

*Ecuación 4*

Con estos valores ya se puede establecer el primer balance energético del sistema. Este balance se realiza alrededor de la placa e indica que la energía que ingresa al sistema a través de las resistencias es igual a la energía saliente mediante radiación y convección. Se observa el balance en la Ecuación 5.

$$Q_{in,placa} = Q_{rad,placa} + Q_{conv,placa}$$

*Ecuación 5. Balance energético alrededor de la placa.*

Se analiza ahora el calor en la caja. Ésta se encuentra cubierta en su interior por lana de vidrio de 5 [cm] de grosor para mejorar la aislación térmica entre la placa y el medio ambiente. Se vuelve a utilizar la Ecuación 3, en esta ocasión para establecer el calor emitido por radiación entre las paredes interiores de la caja, también se vuelve a utilizar la Ecuación 4 para obtener el calor recibido por convección y se utiliza la Ecuación 6 para obtener el calor por conducción a través de las paredes de la caja; donde "k" representa el coeficiente convectivo, " $T_1$ " corresponde a la temperatura de su superficie interior, " $T_2$ " corresponde a la temperatura en su superficie exterior, "d" corresponde al grosor de la pared y "A" representa el área total de la pared:

$$Q_{cond} = \frac{k \cdot A}{d} \cdot (T_1 - T_2)$$

*Ecuación 6*

Ya en la última parte del sistema, se analiza la interacción entre la caja y el ambiente. Se vuelve a utilizar la Ecuación 3 y también la Ecuación 4 para establecer las pérdidas de calor por convección y radiación desde cada superficie de la caja hacia el medio.

Cabe destacar que la temperatura de cielo aparece en tres ocasiones en este sistema de ecuaciones; primero en el cálculo del calor por radiación perdido por la placa hacia el agujero

de la caja, donde el sumidero es el cielo, también cuando se calcula el calor emitido por radiación en la parte superior de la superficie externa de la caja, la cual tiene como superficie receptora el cielo principalmente y en menor medida la superficie de edificios circundantes. Por último, también se considera que las caras laterales de la caja emiten, en una menor fracción, hacia el cielo, siendo mayor su emisión hacia las paredes de edificios circundantes al lugar donde se realizaron las mediciones. Se observan a continuación en la Ilustración 6 y en la Ilustración 7 imágenes panorámicas del espacio circundante al lugar donde se tomaron las mediciones.



*Ilustración 6. Alrededores del lugar donde se midió la temperatura de cielo.*



*Ilustración 7. Alrededores del lugar donde se midió la temperatura de cielo.*

### 5.3. Flujos de Energía

Con el objetivo de dejar más claros los flujos de energía explicados en el punto anterior mediante ecuaciones, se realiza un esquema de dichos flujos en el sistema (Ilustración 8). Se consideran todos los intercambios energéticos desde la alimentación de las resistencias con electricidad hasta la emisión de calor hacia el cielo y alrededores mediante convección y radiación.

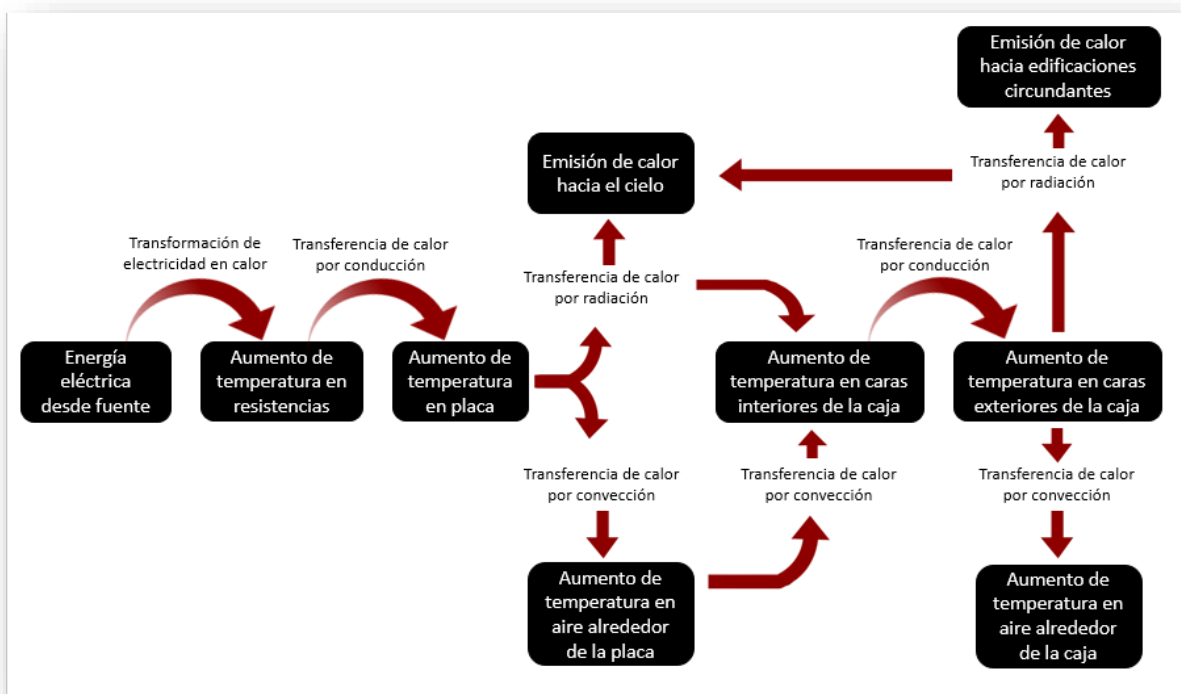


Ilustración 8. Flujos de energía en el sistema.

## 5.4. Diagrama de Bloques

Se realiza un diagrama de bloques resumiendo el sistema realizado en el software EES con todos los valores de ingresados al sistema, tanto los constantes como los medidos en el momento, también los principales cálculos involucrados y por último se describen los principales resultados que entrega el sistema de ecuaciones.

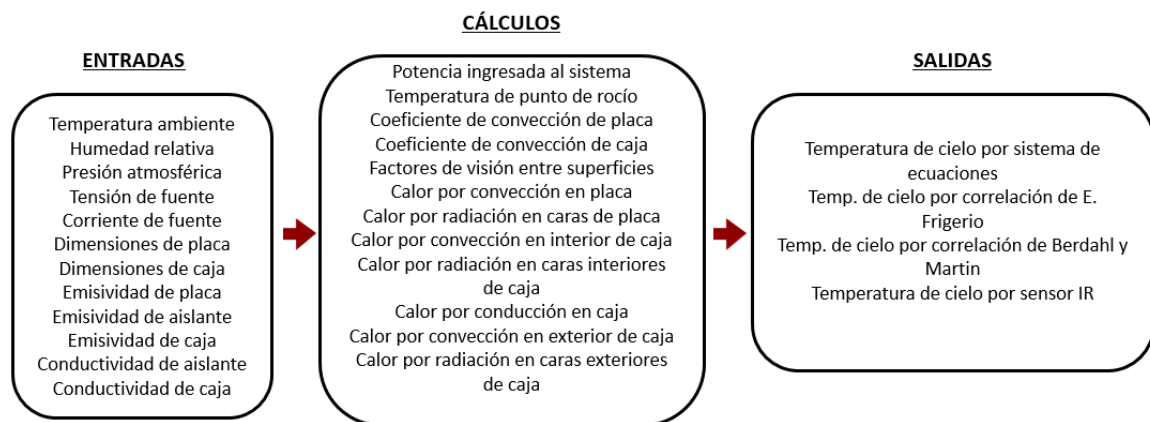


Ilustración 9. Diagrama de bloques con inputs, cálculos y outputs.

## 6. Construcción Del Instrumento

### 6.1. Descripción General

Este instrumento es, en términos simples, una placa metálica, la cual se encuentra dentro de una caja plástica cuyo interior se ha cubierto con material aislante. Dicha caja tiene un orificio circular en la parte superior. Se consideró cubrir el agujero con material transparente para mejorar la aislación térmica del interior de la caja pero esto tiene el inconveniente de intervenir la radiación incidente y emitida por la placa, incluso si se utiliza un material de alta transmisividad para ondas largas. Por esto se decidió finalmente dejar el agujero descubierto.

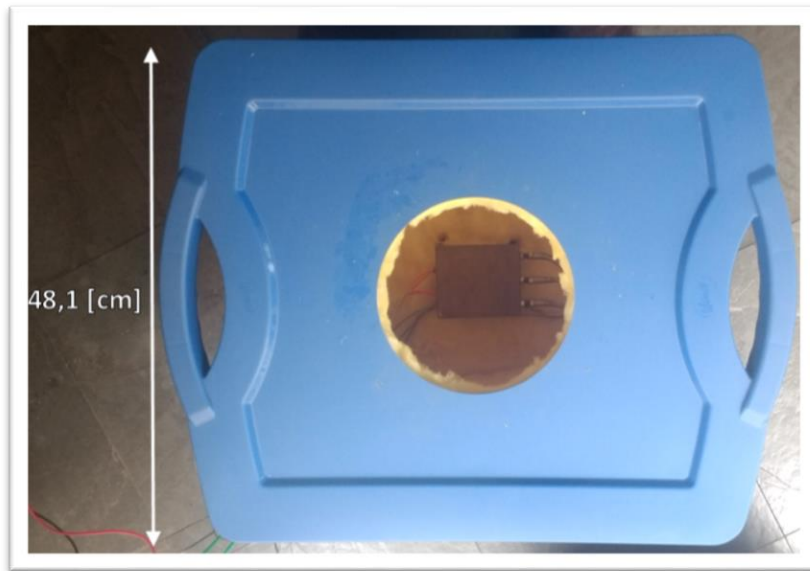


*Ilustración 10. Vista superior de caja con la placa de cobre en su interior*

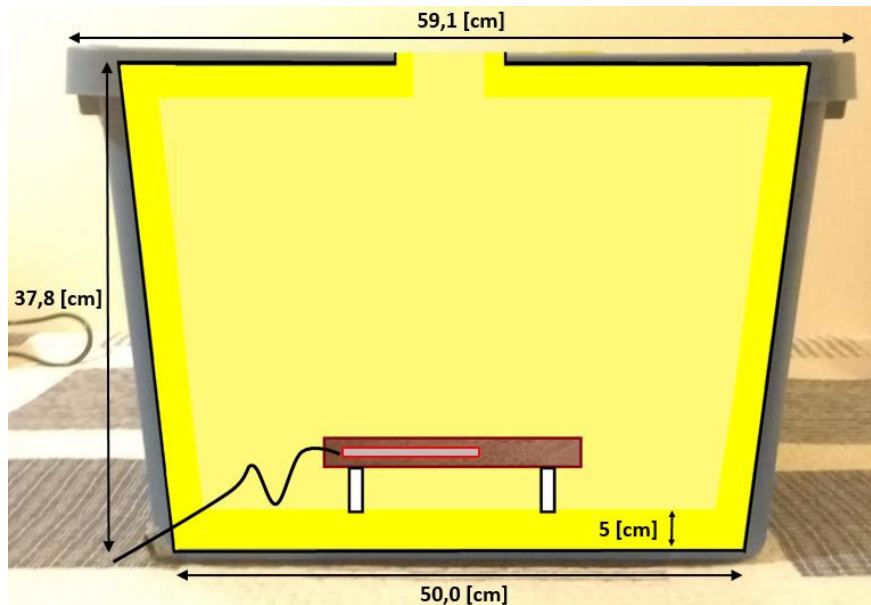


*Ilustración 11. Vista en corte lateral de caja.*

Por otro lado, la temperatura de la placa se eleva con resistencias eléctricas en su interior y al mismo tiempo se mide su temperatura mediante sensores de alta precisión, los cuales también se encuentran en el interior de la placa. Se mide también la temperatura ambiente y la humedad relativa del lugar.

La placa tiene entonces intercambio de energía con los calefactores, con el aire que la rodea por convección y por radiación con las paredes interiores de la caja y con el cielo mediante el orificio superior. También se debe considerar la transferencia de calor por radiación y convección que tiene la caja con el exterior y las paredes internas de la caja entre ellas. Puesto que se conoce con precisión la energía que ingresa a la placa y también las propiedades térmicas de todos los materiales y sus dimensiones, el sistema de ecuaciones relativamente sencillo descrito en el capítulo anterior puede entregar la temperatura de cielo.

Por último, después de realizar suficientes mediciones con esta configuración, se retira la placa de la caja y se toman mediciones con la placa a la intemperie. Por supuesto, en este caso el sistema de ecuaciones en el programa EES es bastante más sencillo.

## 6.2. Selección de Materiales

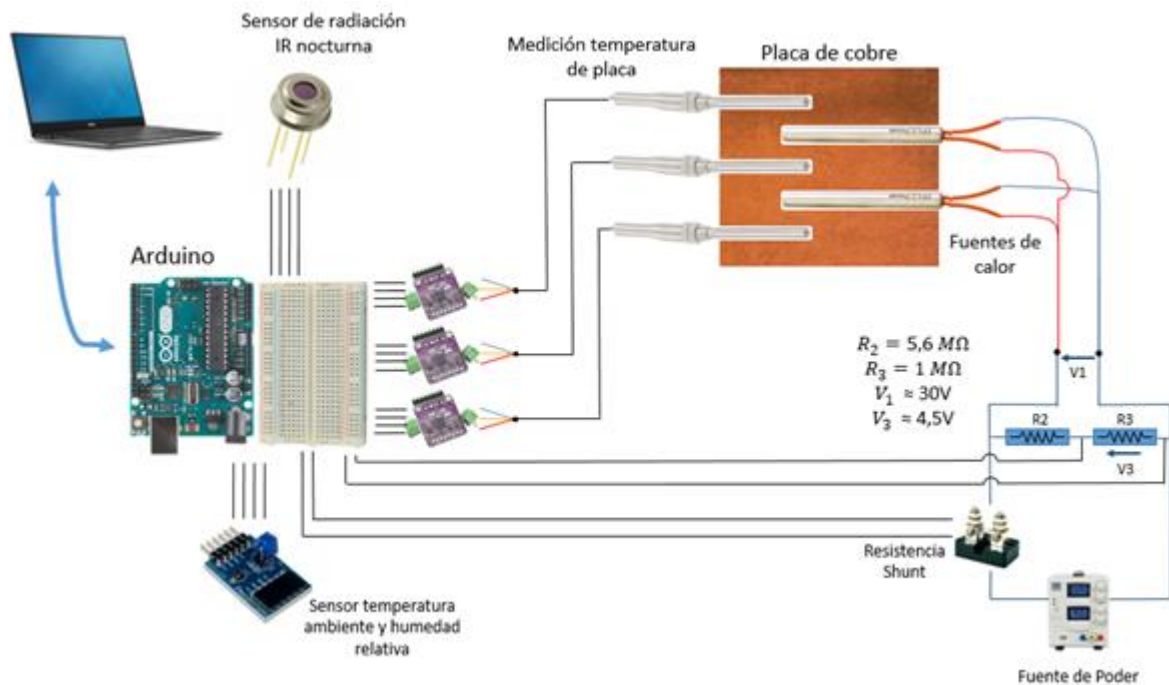


Ilustración 12. Esquema de sistema de medición de temperatura de cielo

### 6.2.1. Placa Emisora

El elemento de mayor importancia de este equipo es la placa metálica, debido a que su temperatura es el principal factor para determinar la temperatura de cielo. Por esto, se deben conocer las propiedades térmicas, tanto la emisividad como el coeficiente de conducción para que los resultados obtenidos sean lo más precisos posibles. Se decide que la placa será de cobre (ver Ilustración 13 e Ilustración 14), por su disponibilidad, su conocida y estable

emisividad, (se obtiene este valor mediante una cámara térmica FLUKE Ti400, la cual entrega un valor de emisividad de 0,66 en el rango infrarrojo. Si bien existe una dependencia de emisividad con respecto a la longitud de onda, se observa que ésta es muy baja y específicamente en el rango de interés, entre los 8 y 14  $[\mu m]$ , la variación es de 0,004 [29] lo que, analizando la sensibilidad de este parámetro en el sistema de ecuaciones del software EES, tiene baja relevancia comparado con otros parámetros. Luego, se asume la emisividad constante) y también por su alta conductividad térmica, la cual tiene un valor de  $401 [W/m \cdot K]$  a una temperatura de  $300 [K]$ . Esta propiedad tiene una ligera pendiente negativa con respecto a la temperatura, bajando a  $394 [W/m \cdot K]$  cuando la temperatura sube a  $400 [K]$  [30]. Es esencial que esta última característica sea lo más alta posible porque se tienen dos fuentes de calor localizadas en el interior de la placa y esta energía se debe propagar por todo el cuerpo para que su temperatura sea homogénea en todos los puntos. Esto no se lograría en un material de baja conductividad térmica. En la Ilustración 24 en Anexos se puede observar el plano de esta placa con las perforaciones a realizar tanto para las resistencias como para los sensores de temperatura.



*Ilustración 13. Placa de cobre con orificios para sensores de temperatura.*



*Ilustración 14. Placa de cobre con orificios para resistencias.*

Con las resistencias entregando calor, la placa de cobre aumenta su temperatura hasta  $60^{\circ}C$  con una temperatura ambiente de  $18^{\circ}C$ . Con este dato, se decide utilizar cuatro soportes de plástico del tipo poliamida 6, conocido como Technyl. Este material puede resistir una

temperatura de  $100^{\circ}\text{C}$  sin ningún tipo de deformación, tiene la rigidez necesaria para soportar el peso de la placa y posee una baja conductividad térmica ( $0,29 \left[ \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$  [31]) comparada con la del cobre que es  $401 \left[ \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$ . Es decir, su conductividad es unas 1.400 veces menor. Considerando esta información, se puede despreciar el calor perdido en los soportes.

### **6.2.2. Sensores de Temperatura**

Los sensores de temperatura de placa escogidos son PT100 de clase A, de  $36 \text{ [mm]}$  de largo y  $6,35 \text{ [mm]}$  de diámetro. Este es un dispositivo termo-resistivo (RTD). Se utilizan tres sensores dentro de la placa para una mayor precisión.

El ajuste de los sensores se realiza en el laboratorio de termo-hidráulica del campus San Joaquín de la UTFSM, el cual cuenta con un baño termostático. Los sensores se sumergen y se registran sus valores mientras se alza la temperatura del agua del baño. Puesto que este rango de temperatura es limitado, se necesitan otros recursos para realizar una buena calibración del instrumento, por lo que se sumergen en una interfaz agua-hielo. Esta mezcla se encuentra a  $0^{\circ}\text{C}$ . Por último, se hace ebullicir el agua y se sumergen los sensores en ella. Se sabe que el ésta ebulle a  $100^{\circ}\text{C}$  al nivel del mar. Sin embargo, el lugar donde se llevó a cabo la prueba se encuentra a una altura de 647 metros sobre el nivel del mar, con un punto de ebullición de  $97,89^{\circ}\text{C}$  [32]. (Ver Ilustración 15, Ilustración 16 e Ilustración 17)



*Ilustración 15. PT100 utilizada para medir temperatura de placa, se utilizan tres unidades.*



*Ilustración 16. Calibración de sensores en baño termostático*



*Ilustración 17. Calibración de sensores en hielo.*

Una vez registrados los datos, se obtiene un factor de corrección para cada uno de los tres sensores, se comparan las mediciones corregidas de los tres sensores con un termómetro de precisión  $0,1^{\circ}\text{C}$  y se observa que los sensores se mantienen dentro de un rango de  $0,14^{\circ}\text{C}$  alrededor de la medición del termómetro de referencia. Las mediciones realizadas en el baño termostático se pueden apreciar en el Gráfico 1. Este gráfico muestra la temperatura real medida con el termómetro de precisión  $0,1^{\circ}\text{C}$  (recta azul) y las mediciones de las tres PT-100 en naranja, celeste y amarillo, estos valores son previos a la corrección. Se puede observar que al aumentar la temperatura, las mediciones se van alejando del valor real, aumentando el error. Afortunadamente en este rango de temperatura, las mediciones forman una recta por lo que se puede aplicar un factor de corrección a cada uno de los sensores y así obtener la precisión ya mencionada.

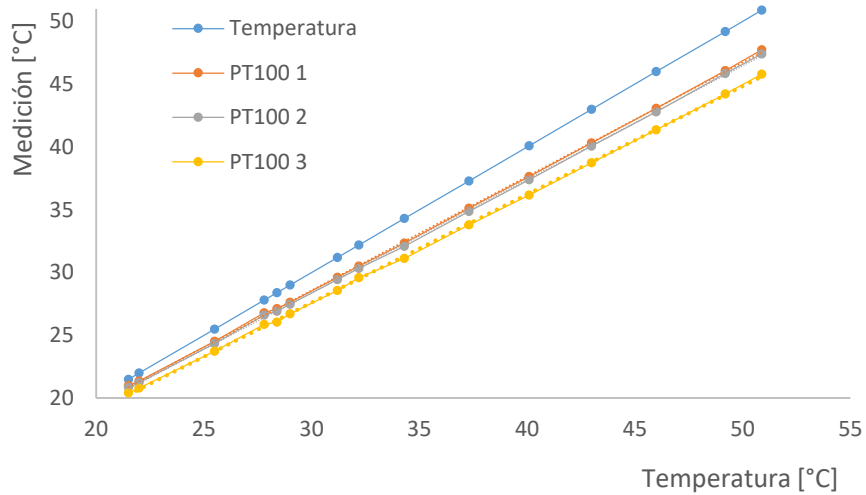


Gráfico 1. Medición de tres sensores de temperatura en comparación con temperatura medida con termómetro.

Al utilizar los tres sensores al mismo tiempo, mejora la precisión a  $0,08^{\circ}\text{C}$  (Ecuación 9 en la sección Anexos). Este valor de precisión es aceptable ya que se ha analizado mediante el software EES la precisión requerida para obtener un resultado con bajo nivel de error, como se muestra en el análisis de sensibilidad en la Ilustración 23. Tabla obtenida en EES de sensibilidad de factores medidos.

### 6.2.3. Caja Exterior

La caja exterior es de polipropileno. A una temperatura de  $27^{\circ}\text{C}$ , este material posee una alta emisividad de 0,97 [33] y una conductividad térmica de  $0,19 \left[ \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$  [34]. Estos valores tienen poca variabilidad en un rango de temperatura cercano al ambiental y puesto que se espera que este material no se aleje de estas temperaturas, se utilizan estos valores en el análisis del sistema.

#### 6.2.4. Sensor Infrarrojo de Temperatura

Para complementar los resultados medidos por el sistema y los cálculos realizados con las correlaciones, se utiliza el sensor de temperatura infrarrojo Melexis MLX90614 (Tabla 2) que puede medir la temperatura de cielo sin problemas ya que es sensible a radiación en el rango de  $5,5 [\mu m]$  a  $14 [\mu m]$  [35]. Este dispositivo se conecta al Arduino, aumentando así su error de  $0,5 [K]$  a  $0,525 [K]$  (puesto que envía la información al Arduino, su error aumenta porque el Arduino Uno tiene una resolución análoga de 10 bits [36]. Esto se calcula con la Ecuación 8 de propagación del error en el Anexo). [35, 13]

#### 6.2.5. Aislante de Caja

El interior de la caja plástica se cubre con material aislante. Se escoge para este propósito una capa de lana de vidrio de marca Volcan tipo AislanGlass R122. Se decide utilizar este material por su disponibilidad y por sus propiedades térmicas (su conductividad térmica tiene baja variación con respecto a la temperatura; a  $0^{\circ}C$  presenta un valor aproximado de  $0,031 [W/m \cdot K]$  mientras que a  $40^{\circ}C$  presenta un valor de alrededor de  $0,037 [W/m \cdot K]$  [37]. Es por lo tanto un buen aislante térmico, cumpliendo su función de mantener la mayor cantidad de calor dentro de la caja. La emisividad de este material debe ser considerada también ya que cada una de las superficies emite radiación térmica hacia la placa y hacia las otras superficies interiores. Este valor es de 0,97, incluso casi se podría considerar como un cuerpo negro.



*Ilustración 18. Caja plástica cubierta en su interior con lana de vidrio.*

#### **6.2.6. Resistencias**

Para elevar la temperatura de la placa se decide utilizar dos resistencias tipo cartucho. Estos calentadores son de marca Maxi watt y pueden entregar una potencia de hasta 315 [W] cada uno. Sus medidas son 4" de largo y 1/4" de diámetro, este elemento se puede apreciar en la Tabla 2. Se utiliza este tipo de resistencia debido a que su forma cilíndrica facilita el trabajo ya que sólo se requiere agujerear la placa con la broca adecuada y con la profundidad suficiente para que la resistencia pueda entrar en su totalidad. Se concluye que gracias a la buena conducción térmica de la placa de cobre, basta utilizar dos resistencias para que el calor sea homogéneo en la placa. Además, para que exista el mínimo contacto entre el aire y la resistencia, se procesa un pequeño cilindro de cobre y se utiliza como tapón en la entrada, dejando sólo el espacio justo para que los cables salgan. Se cubren las resistencias con una delgada película de una pasta de disipación térmica marca Halnziye tipo HY880 para mejorar la transferencia de calor entre las resistencias y la placa.

### **6.2.7. Sensor de Condiciones Ambientales**

La temperatura en el medio ambiente y la humedad relativa son obtenidas mediante el sensor Digilent Pmod HYGRO TI HDC1080 (Tabla 2). Este dispositivo se conecta al Arduino Uno mediante cuatro pines y tiene una precisión de 2% de la escala total para la humedad y de  $0,2^{\circ}\text{C}$  para la temperatura ambiente. Los valores que registra este sensor son de gran importancia porque la temperatura ambiente se utiliza en el sistema de ecuaciones que finalmente entrega la temperatura de cielo y además ambos valores medidos por este sensor son factores importantes en las correlaciones utilizadas para determinar la temperatura de cielo de manera teórica, las cuales servirán como valor de referencia. Los valores de tolerancia del dispositivo considerando la resolución del Arduino son de 2,002 % para la humedad y de  $0,2568^{\circ}\text{C}$  para la temperatura.

### **6.2.8. Fuente de Poder**

Se adquiere una fuente regulable de corriente continua de marca Ele-Tech modelo HY3005E con un máximo de 30 [V] y 5 [A] para alimentar las resistencias ya mencionadas. Se puede apreciar en la Tabla 2.

### **6.2.9. Medidores de Corriente y Tensión en Resistencias**

Para poder realizar un balance energético adecuado, se debe conocer con buena precisión tanto la corriente como la tensión con que se alimentan las resistencias que calientan la placa. Para conocer la corriente, se utiliza una resistencia de alta precisión, (Resistencia Shunt) con valor de resistividad de  $0,01[\Omega]$  y una precisión de 0,25%. Esta se coloca en serie entre la fuente y las resistencias. Se utiliza un conversor análogo digital modelo ADS1115 de 16 bits de resolución para poder obtener el voltaje deseado (todos estos

elementos se pueden observar en la Tabla 2) y utilizando la ley de Ohm (Ecuación 10 en Anexos).

Puesto que se utiliza el Arduino Uno para medir la tensión entre los terminales de las resistencias, el valor medido no puede superar los 5 [V] y debido a que la tensión se fija en alrededor de 30 [V], es necesario utilizar un divisor de tensión; esto se indica en la Ilustración 12 donde se puede apreciar que se colocan en el sistema dos resistencias en serie entre ellas y ambas en paralelo con las resistencias de cartucho. Estas resistencias tienen valores muy altos de 1[M $\Omega$ ] (R3) y 5,6 [M $\Omega$ ] (R2) (Ver Tabla 2) para que la corriente en ellas sea la mínima y no influya en el correcto funcionamiento del sistema. Al realizar el divisor de tensión en este circuito, la tensión final medida por el Arduino es de alrededor de 4,5 [V].

### 6.3. Dimensionamiento

Gracias a la herramienta del software EES que permite conocer qué tan influyente es cada parámetro ingresado para el resultado buscado, se pueden obtener las dimensiones ideales del instrumento para que sea lo más pequeño posible sin llegar a dimensiones que puedan perjudicar los resultados. Tras este análisis se decide adquirir una caja con medidas nominales de 60,3 x 48,1 x 37,8[cm]. Se debe considerar que el interior de esa caja se cubre con una capa de lana de vidrio de 5 [cm] de espesor.

Por otro lado, para obtener una superficie de radiación significativa en la placa, sin que sus dimensiones sean demasiado grandes, se decide utilizar una placa de cobre de 93,55 [mm] de ancho, 108,20 [mm] de largo y 12,60 [mm] de alto, la cual va colocada horizontalmente dentro de la caja y apoyada en sus cuatro esquinas sobre los soportes de Technyl. El plano de esta placa se puede observar en el anexo. Sus pilares tienen un perfil circular de 7,50 [mm] de diámetro y un largo de 80 [mm]. Como se dijo previamente, la

pérdida de calor a través de los soportes se puede despreciar. Todas las mediciones de la placa se realizaron con un pie de metro bien ajustado, por lo que su precisión es de  $\pm 0,05$  [mm] mientras que las mediciones de la caja se realizaron con una huincha de medir corriente por lo que su precisión es de  $\pm 0,5$  [mm].

Se instala el sistema completo en el techo de un edificio en la ciudad de Santiago. Éste se puede observar a continuación:

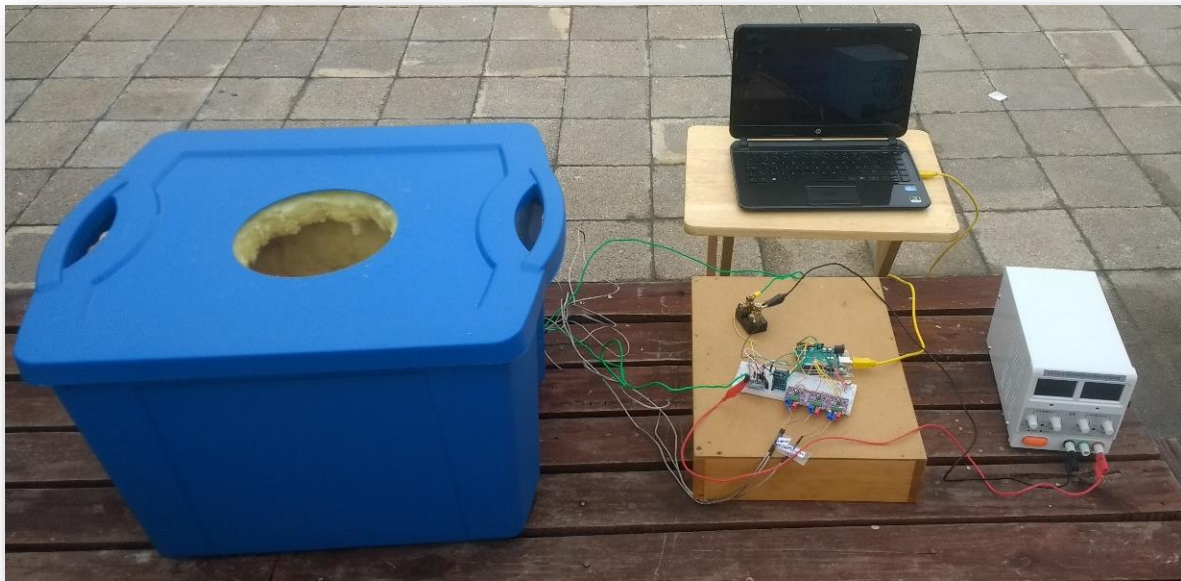


*Ilustración 19. Sistema de medición de temperatura de cielo.*

#### 6.4. Tabla Resumen de Elementos

| Elemento                                           | Imagen                                                                              | Uso                                                          | Detalles                                                                         |
|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Placa de cobre                                     |    | Elemento radiador de calor                                   | Dimensiones:<br>Alto: 11 [cm]<br>Largo: 9,4 [cm]<br>Ancho: 1,2 [cm]              |
| Sensor de Temperatura PT100 Clase A                |    | Medición de temperatura de placa de cobre con tres sensores. | Precisión:<br>0,14 °C.                                                           |
| Caja plástica Wenco                                |   | Aislar placa emisora del ambiente.                           | Alto: 37,8 [cm]<br>Ancho: 43 [cm]<br>Largo: 47 [cm]                              |
| Sensor infrarrojo de temperatura Melexis MLX 90614 |  | Realizar medición de temperatura de cielo.                   | Precisión:<br>0,525 °C                                                           |
| Lana de vidrio Volcán AislanGlass R122             |  | Aumentar aislación entre placa de cobre y medio ambiente.    | Coeficiente de conducción térmica:<br>$0,037 \left[ \frac{W}{m \cdot K} \right]$ |
| Resistencia tipo cartucho Maxi watt                |  | Elevar temperatura de placa de cobre.                        | Potencia máxima:<br>315 [W]<br>Largo: 4"<br>Diámetro: 1/4"                       |

|                                                                  |                                                                                     |                                                                       |                                                                                       |
|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Sensor de condiciones ambientales Digilent Pmod HYGRO TI HDC1080 |    | Medir temperatura ambiente y humedad relativa.                        | Precisión temperatura ambiente: 0,2568 °C.<br>Precisión humedad relativa: 2,002% (FS) |
| Fuente de poder Ele-Tech HY3005E                                 |    | Alimentar resistencias de cartucho con electricidad fija.             | Tipo de corriente: continua.<br>Tensión máx: 30 [V]<br>Corriente máx: 5 [A]           |
| Resistencia Shunt Murata                                         |    | Obtener el valor de la corriente que circula por las resistencias.    | Resistividad: 0,01 [ $\Omega$ ]<br>Precisión: 0,25%                                   |
| Resistencias                                                     |   | Realizar divisor de tensión para que el Arduino pueda medir tensión.  | Resistividad: 1 [ $M\Omega$ ] y 5,6 [ $M\Omega$ ]<br>Precisión: 1%                    |
| Conversor análogo digital ADS1115                                |  | Convertir señal de tensión de resistencia Shunt de análogo a digital. | Resolución:<br>16 bits                                                                |
| Conversor análogo digital MAX31865                               |  | Convertir señal de temperatura de PT100 de análoga a digital.         | Resolución:<br>15 bits                                                                |
| Arduino Uno R3                                                   |  | Recibir datos de sensores y enviarlos al computador.                  | Resolución:<br>10 bits                                                                |

Tabla 2. Elementos utilizados en el sistema.

El error final de cada valor medido se obtiene gracias a la Ecuación 8 en Anexos, fórmula que entrega la propagación del error. El error de medición, el cual se determina por la cantidad de mediciones y por la desviación estándar de estas, resulta despreciable con respecto a los otros factores, principalmente debido a la gran cantidad de mediciones realizadas.

## 7. Resultados

Se realizan mediciones en las noches del mes de Julio en que el clima lo permite registrando temperatura ambiente, humedad relativa, temperatura de cielo obtenida por el sensor infrarrojo, temperatura de placa y corriente y voltaje de alimentación a las resistencias. Se configura el Arduino para obtener todos estos datos cada 5 segundos y se realiza un promedio cada minuto, es decir, cada 12 mediciones. Mediante el software EES se obtiene la temperatura de cielo y se grafica con respecto a la hora.

Se grafican la temperatura ambiente en color naranja ( $T_{amb}$ ), la temperatura de cielo obtenida en el sistema de ecuaciones en color verde ( $T_s$ ), dos valores de temperatura de cielo calculados a partir de correlaciones de la Tabla 1 en amarillo y celeste, las mediciones de temperatura de cielo del sensor infrarrojo se muestran en negro ( $T_{sensor\ IR}$ ) y la humedad relativa se grafica en color morado.

### 7.1. Placa de Cobre dentro de la Caja.

Se comienza midiendo con la placa ubicada dentro de la caja aislada con una perforación circular de 19 [cm] de diámetro en el centro de la cara superior como se describió previamente. Se muestran a continuación los resultados obtenidos en distintas noches:

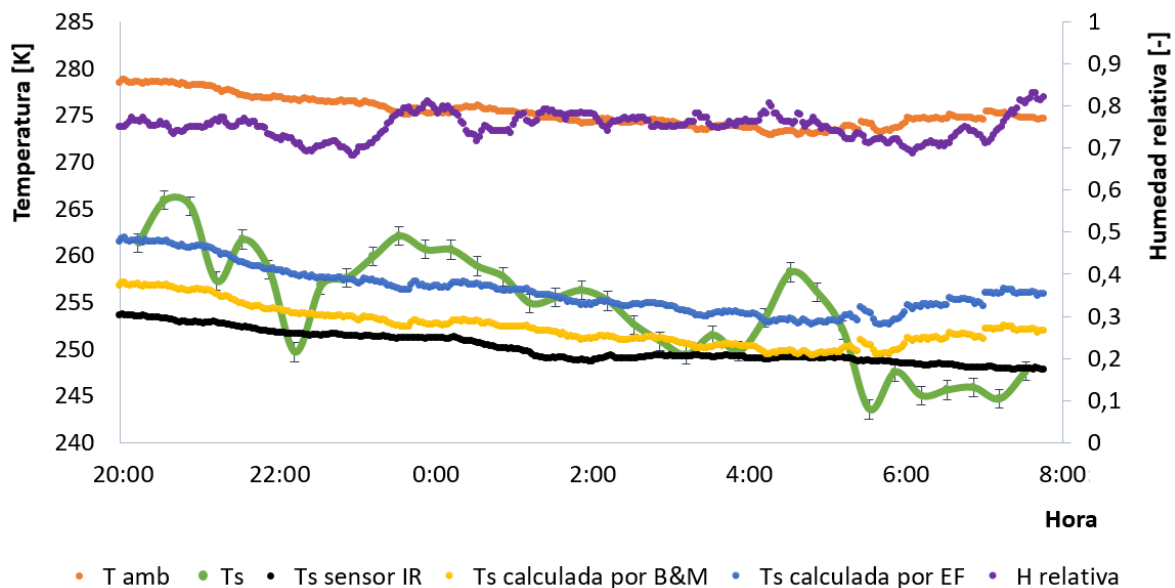


Gráfico 2. Noche del 12 de Julio de 2018. Cielo parcial tendiendo a despejado. La placa de cobre se encuentra dentro de la caja.

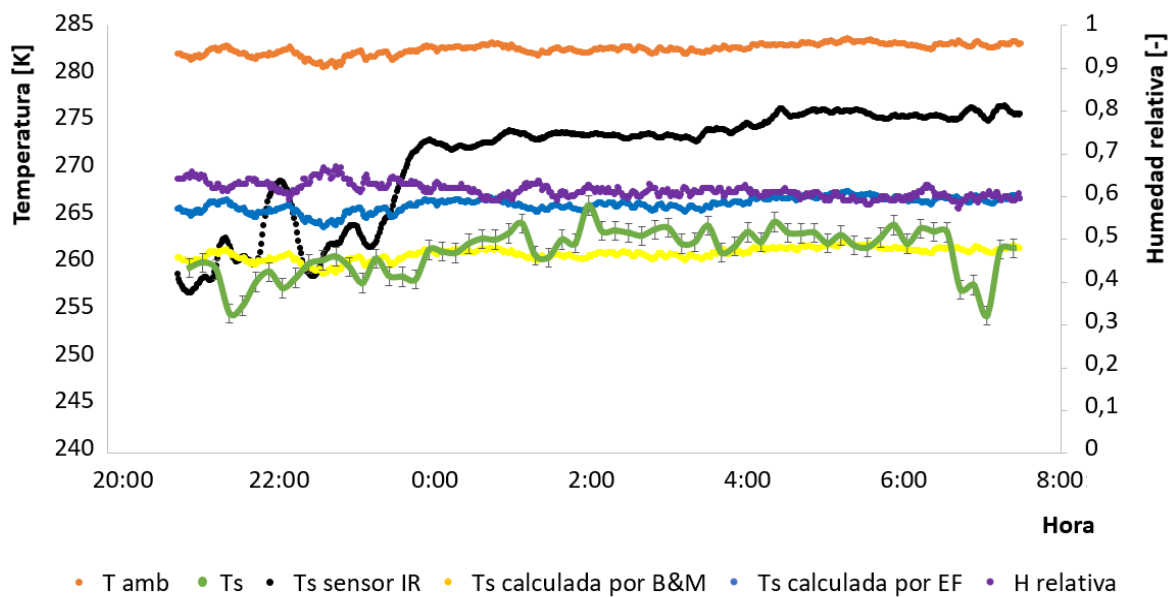


Gráfico 3. Noche del 14 de Julio de 2018. Cielo despejado. La placa se encuentra dentro de la caja

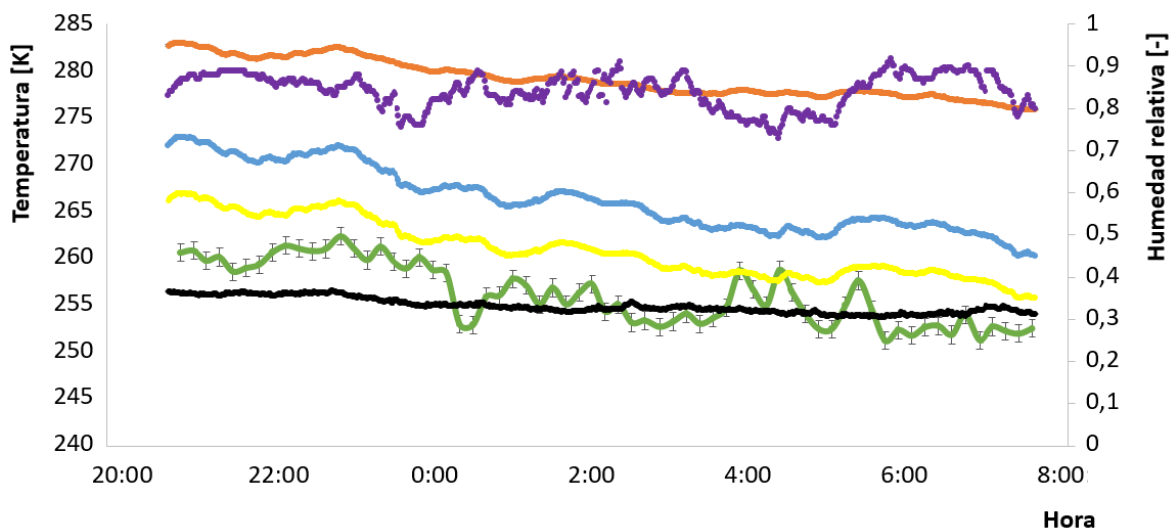
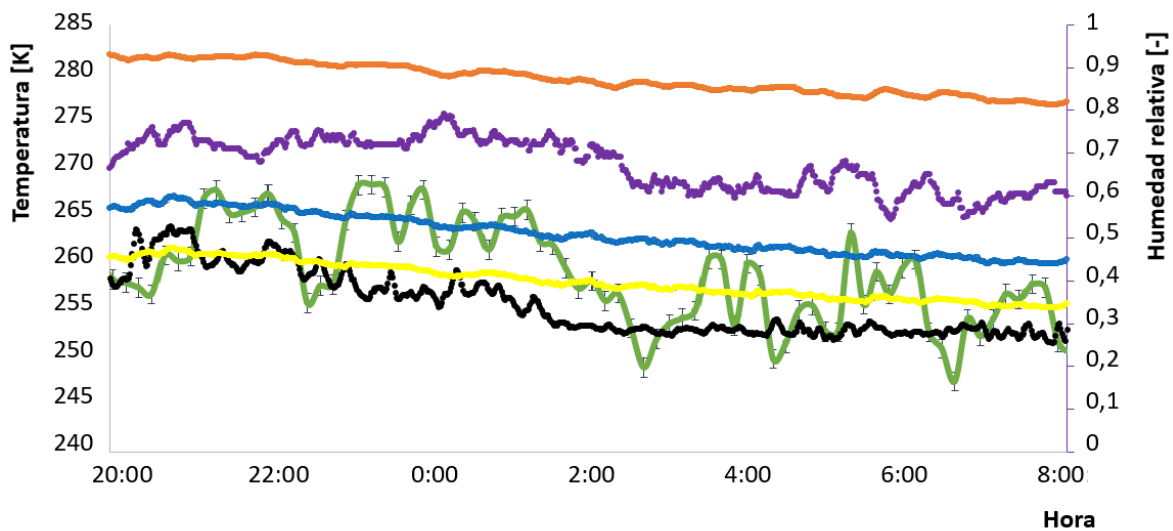


Gráfico 4. Noche del 19 de Julio de 2018. Cielo despejado. La placa se encuentra dentro de la caja.



• T amb • Ts • Ts sensor IR • Ts calculada por B&M • Ts calculada por EF • H relativa

Gráfico 5. Noche del 21 de Julio de 2018. Cielo parcial variando a despejado. La placa se encuentra dentro de la caja.

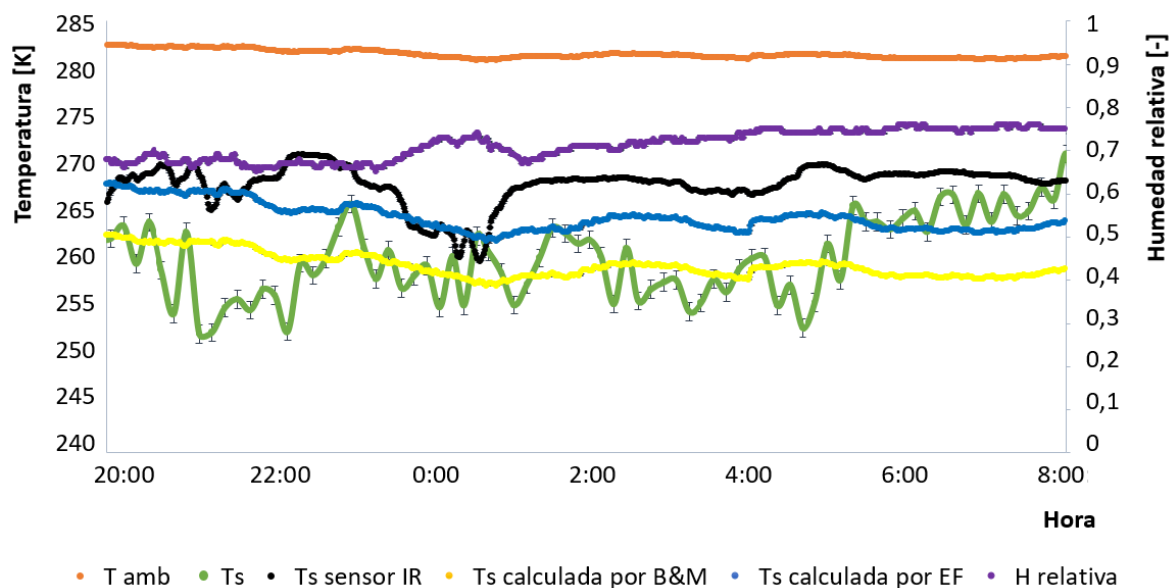


Gráfico 6. Noche del 22 de Julio del año 2018. Cielo parcialmente nublado variando a nublado en la madrugada. La placa de cobre se encuentra dentro de la caja.

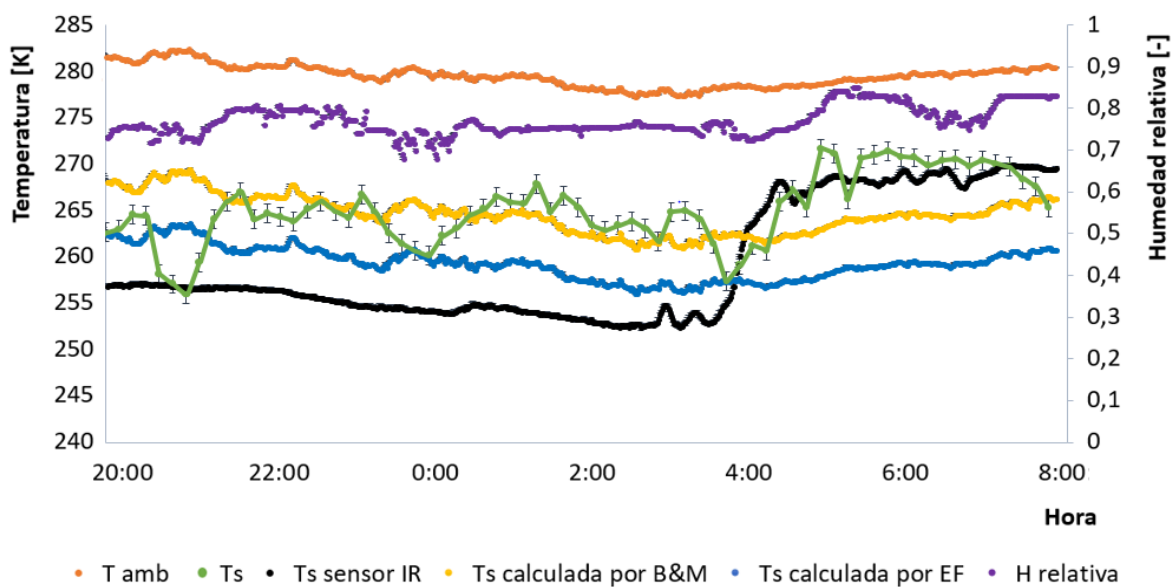


Gráfico 7. Noche del 24 de Julio de 2018. Cielo parcial variando a nublado en la madrugada. La placa de cobre se encuentra dentro de la caja.

Se puede observar en color verde la temperatura de cielo obtenida a partir de los balances energéticos utilizando las mediciones realizadas, en negro los valores obtenidos por el sensor infrarrojo, en celeste y amarillo los valores obtenidos a partir de las dos correlaciones utilizadas como referencia, la obtenida por Berdahl y Martin en 1984 y la publicada por Erico Frigerio en 2006. Se observa que ambas correlaciones entregan valores similares de temperatura de cielo, siendo la curva de Frigerio siempre alrededor de  $5^{\circ}\text{C}$  mayor que la de Berdahl y Martin. Por último se puede observar en color morado la humedad relativa, cuyas unidades se ubican en el eje vertical derecho de cada gráfico.

A simple vista, la primera observación es que todas las curvas de temperatura de cielo obtenidas se ubican siempre por debajo de la curva de temperatura ambiente, lo cual concuerda plenamente con la teoría. Si bien la temperatura de cielo obtenida a partir del sistema de ecuaciones en EES tiene un nivel de dispersión mayor al deseado, se observa que en general en todos los gráficos esta temperatura tiene tendencias similares a las otras curvas, tanto la del sensor infrarrojo como las curvas obtenidas con correlaciones. Se toma como ejemplo el Gráfico 7, que muestra las mediciones obtenidas en una noche que comienza despejada pero que varía a nubosidad total rápidamente alrededor de las cuatro de la mañana. En este caso, se puede observar que las temperaturas obtenidas por el sensor infrarrojo aumentan rápidamente a dicha hora, incluso llegando a temperaturas más altas de lo esperado. El aumento es de  $13^{\circ}\text{C}$  en alrededor de una hora mientras que las curvas obtenidas de las correlaciones también tienen una pendiente positiva pero no tan marcada. La temperatura de cielo obtenida por los balances también tiene esta tendencia a la misma hora.

En gráficos anteriores se puede observar curvas de temperatura de cielo con pendiente negativa, esto sucede cuando, al contrario de lo comentado para el Gráfico 7, el cielo comienza nublado y se despeja durante la noche. Se puede observar claramente el período de tiempo en que se despeja el cielo al ver la parte del gráfico en que la pendiente es más pronunciada hacia abajo. Por ejemplo, en el Gráfico 5 entre las 1 y las 2 de la mañana se

genera un descenso de la temperatura de cielo, manteniéndose relativamente constante el resto del tiempo. Se puede observar además que en el Gráfico 4 los valores se mantienen relativamente constantes, descendiendo ligeramente durante la noche pero este descenso no es concluyente para asegurar que haya aumentado la nubosidad. De hecho, esa noche se mantuvo despejada. Se observa que la temperatura de cielo obtenida con el sensor infrarrojo desciende muy levemente, alrededor de  $3^{\circ}\text{C}$  mientras que en las otras curvas de temperatura de cielo el descenso es de unos  $8^{\circ}\text{C}$ .

En todos los gráficos se puede observar que la temperatura de cielo es, a grandes rasgos, alrededor de 25 grados menor que la temperatura ambiente en cielos despejados y entre 15 y 20 grados menor que ésta en cielos nublados. Estos valores concuerdan con lo que dice la literatura.

Se observa también que la variación de la humedad relativa en el lugar concuerda con lo predicho en capítulos anteriores. Es decir, la humedad tiene relación directa con la temperatura de cielo. Esto se observa claramente en el Gráfico 2 y en el Gráfico 7, donde se observan cambios marcados en la curva morada correspondiente a la humedad relativa y las curvas de temperatura de cielo tienen tendencias similares.

Un factor común en todos los gráficos es el desfase temporal existente entre la temperatura de cielo obtenida por los balances y las otras tres curvas; esto se debe a que estas tres curvas de temperatura se obtienen a partir de sensores que captan la variación de condiciones de manera casi instantánea mientras que la temperatura de cielo obtenida con los balances en el software EES es la única que se obtiene a partir del cambio de temperatura de la placa de cobre. Ésta demora cierto tiempo en variar su temperatura si hay un cambio de temperatura ambiente y además es medida con los sensores PT100, los cuales demoran varios minutos en medir la temperatura indicada. Este tiempo de desfase se pudo corroborar al

realizar el ajuste de los sensores PT100 en el baño termostático, donde los sensores sumergidos en agua podían demorar hasta 20 minutos en estabilizarse luego de alzar la temperatura en 3°C.

## 7.2. Placa Emisora Expuesta al Ambiente

Se realizan mediciones con la placa de cobre expuesta a la intemperie, sin la caja aislante. Se realiza otro sistema de ecuaciones en el software EES que represente este caso particular y se realiza el mismo procedimiento que en las mediciones anteriores, calculando la temperatura de cielo a partir de las mediciones realizadas.

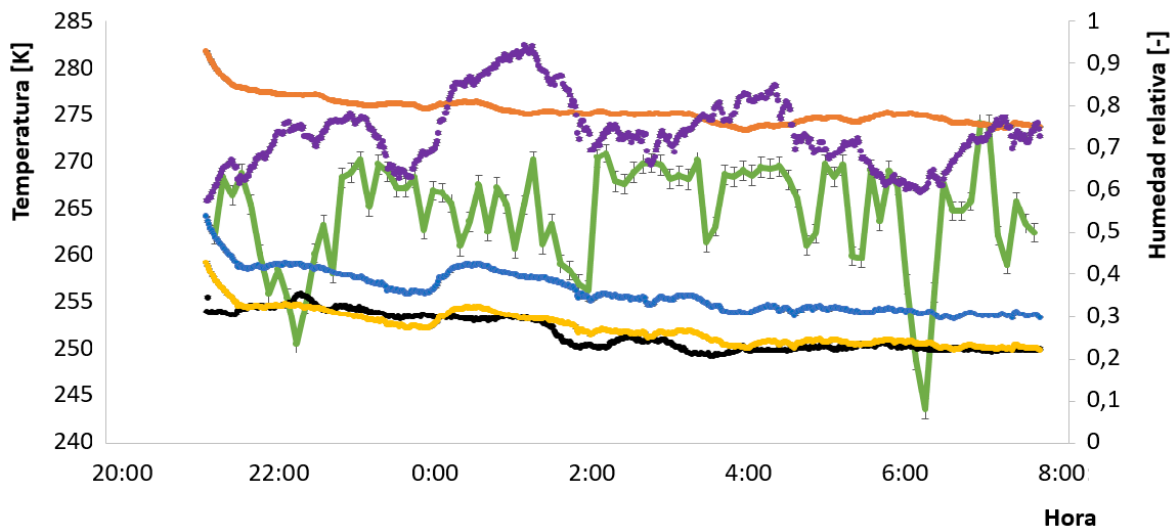


Gráfico 8. Noche del 7 de Agosto de 2018. Cielo despejado. La placa de cobre se encuentra a la intemperie.

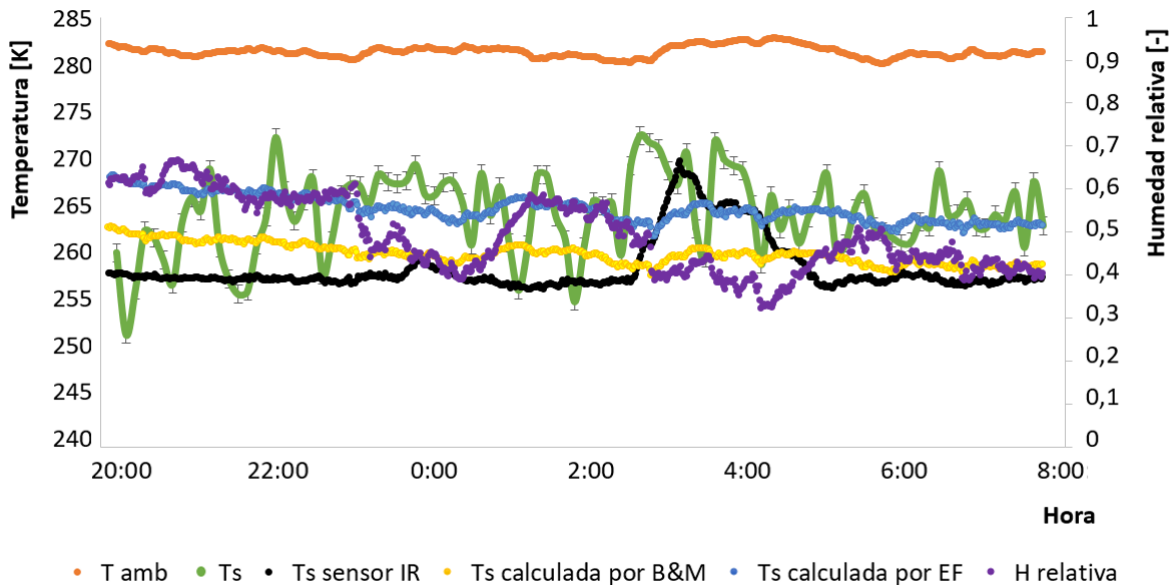


Gráfico 9. Noche del 8 de Agosto de 2018. Cielo despejado. La placa de cobre se encuentra a la intemperie.

Se observa en ambos gráficos que la dispersión de la temperatura de cielo obtenida por el sistema de ecuaciones es demasiado grande para establecer una tendencia. Si bien se realizaron mediciones con esta configuración en seis noches distintas, todos los gráficos entregan datos similares por lo que no es necesario integrarlos todos al informe. En resumen, no se puede obtener la temperatura de cielo de manera precisa con esta configuración del sistema ya que la variabilidad de los resultados hace imposible realizar un análisis concluyente.

### 7.3. Placa Emisora Expuesta al Ambiente con Papel Aluminizado

De la misma manera que en la sección anterior, se coloca la placa libre en el techo del edificio pero en esta ocasión se coloca en el suelo bajo ella dos metros cuadrados de papel aluminizado, con un alto índice de reflectividad de 0,86 [38] para observar cambios en la temperatura de la placa al recibir mayor radiación térmica desde el inferior. Por desgracia, al igual que en el caso anterior, la exposición de la placa en el medio ambiente causa que la convección tenga mayor impacto en su temperatura que la radiación recibida por el cielo y

también se genera interferencia por la radiación de los edificios circundantes; generando cambios bruscos de temperatura que se atribuyen a los cambios de corrientes de aire en el techo del edificio o cambios de luz en dichas edificaciones. Igualmente se muestran a continuación dos gráficos de los cuatro obtenidos que representan mediciones en dos noches completas y donde se puede apreciar la alta variación de la temperatura de cielo.

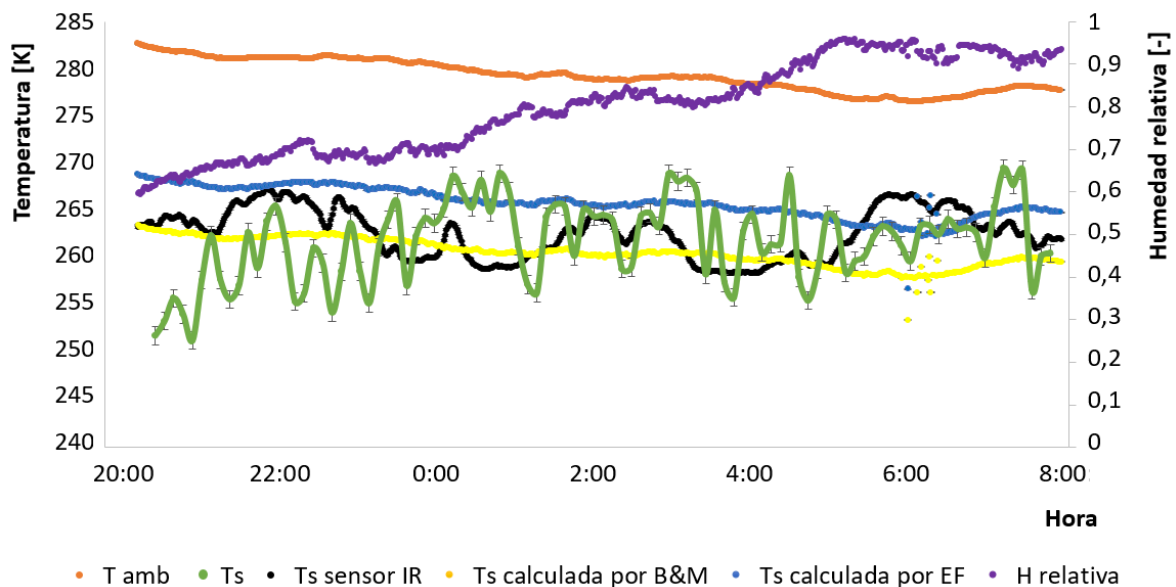


Gráfico 10. Noche del 11 de Agosto de 2018. Cielo despejado variando a nublado. La placa de cobre se encuentra a la intemperie sobre papel aluminizado

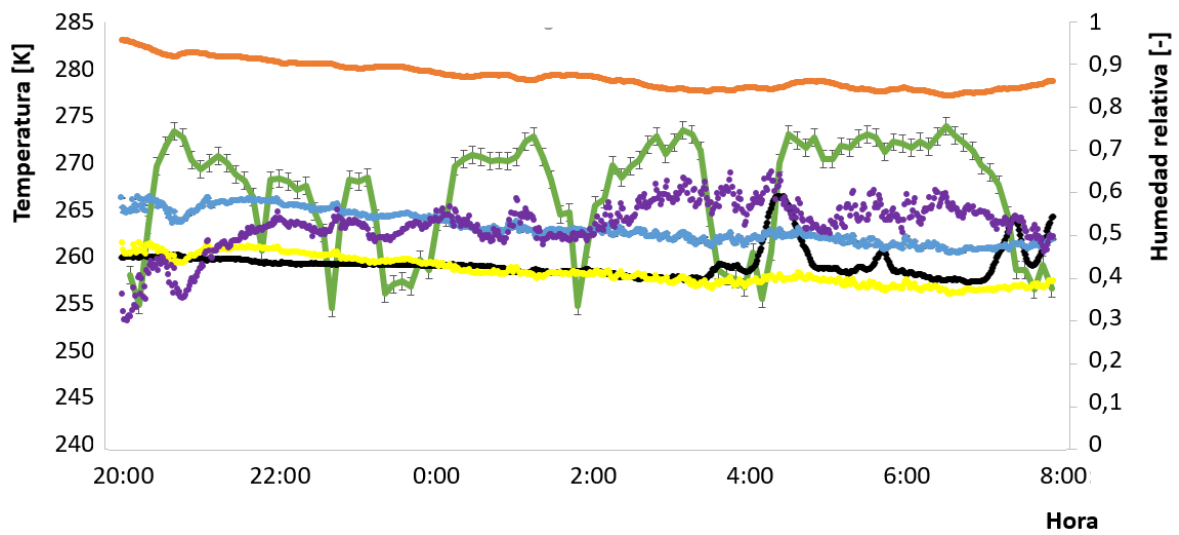


Gráfico 11. Noche del 14 de Agosto de 2018. Cielo despejado. La placa de cobre se encuentra a la intemperie sobre papel aluminizado

## 8. Conclusiones

Se puede concluir que este sistema cumple con el objetivo de efectivamente cuantificar la temperatura de cielo en un lugar y momento determinados. Se comparan los datos obtenidos a partir del sistema de ecuaciones del software EES con los obtenidos mediante correlaciones y con los valores medidos por el sensor infrarrojo obteniendo resultados si bien no siempre similares, dentro de un rango aceptable, sobre todo considerando que el sensor infrarrojo tiene una baja precisión y esto se puede confirmar con los bruscos cambios que en ocasiones se registran. Por ejemplo en el Gráfico 3, en el que aumenta su valor en  $12^{\circ}\text{C}$  en 40 minutos.

Sin embargo, no se logra entregar estabilidad a los valores de temperatura de cielo a pesar de obtener mediciones con alta frecuencia y realizar promedios cada un minuto para obtener una curva más estable. A pesar de esto, se observa que aunque la variabilidad es alta, en general varía en torno a un valor que concuerda tanto con la teoría como con los valores obtenidos por correlaciones y por el sensor infrarrojo.

Utilizando la configuración en la que se deja la placa libre expuesta al ambiente sin la caja aislante, se observa que la temperatura de cielo es demasiado variable como para establecer una tendencia. Esto es debido a la alta variabilidad de la temperatura medida en la placa ya que las otras mediciones se mantuvieron con variaciones similares a las mediciones realizadas previamente con la caja aislante. Se concluye que puesto que la placa se encuentra totalmente expuesta a la intemperie, se ve afectada en mayor nivel por la convección del ambiente y si en algún momento ocurre una ráfaga de viento, ésta enfriará abruptamente la placa. Si bien el fenómeno de convección al ambiente se considera en el sistema de EES, se considera como un valor constante y por lo tanto, no puede representar fielmente la realidad del fenómeno. Como conclusión en este punto, se afirma que esta configuración del sistema

no es útil en la medición de la temperatura de cielo. Sumado a esto, la placa tiene emisión por radiación hacia todo el medio (ver Ilustración 6 e Ilustración 7), quedando expuesta a fuentes de radiación variables como luces de edificios circundantes mientras que si la placa se mantiene dentro de la caja, su interacción por radiación con las paredes interiores de ésta es constante y sólo interactúa con el medio mediante el orificio en la cara superior de la caja. En resumen, la interferencia que se genera al dejar la placa al descubierto afecta los resultados incluso utilizando un sistema de ecuaciones en el software EES adaptado para tales circunstancias.

Durante el análisis de resultados en la sección 7.1 se observa que la curva de temperatura de cielo obtenida con el sistema de ecuaciones en EES tiene un retraso con respecto al resto el cual se le atribuye la lenta respuesta de los sensores de temperatura de la placa. Para obtener una curva que tenga menor desfase temporal con la realidad, se recomienda en el futuro utilizar sensores de temperatura de más rápida respuesta. Si bien los sensores PT100 son de gran precisión, no se consideró que su lenta respuesta podría desplazar la curva de temperatura de cielo hacia la derecha de manera notoria, lo cual sólo se descubrió al observar los gráficos.

El problema de la alta dispersión en los resultados se debe probablemente al sensor de condiciones ambientales utilizado. Si bien su ficha técnica indica que tiene valores de tolerancia aceptables tanto en la medición de temperatura ambiente como en la de humedad relativa, al realizar comparaciones con sensores de alta calidad se observó que existe variabilidad en los resultados e incluso se tuvo que aplicar un factor de corrección tanto para la humedad relativa como para la temperatura ambiente y así mejorar las mediciones.

Con respecto a su utilidad como sistema portátil y económico de medición de temperatura de cielo. Este sistema podría ser de gran utilidad si se utiliza un sensor de temperatura ambiente y uno de humedad relativa que sean de mayor calidad que el sensor

utilizado, ya que se pudo corroborar que los valores medidos por el sensor ambiental no siempre correspondían a los reales. Esta mejora debería corregir el problema de la alta dispersión de los datos medidos y así se podrían obtener valores de temperatura de cielo más estables. Sin embargo, el sensor infrarrojo ha demostrado ser un buen elemento para lograr el mismo propósito si no se requiere gran precisión y además de ser portátil, es muy económico. Sólo se requiere un Arduino u otro dispositivo similar y un computador para registrar los datos. Sin embargo, si se busca mayor precisión sin tener que adquirir un pirómetro, se recomienda el sistema desarrollado en este proyecto.

Si se quiere instalar en alguna edificación un sistema de enfriamiento radiativo, como se vio en la sección 4.5, este sistema sería muy efectivo si se quiere conocer con exactitud la cantidad de energía que obtendrá a partir de la radiación. Esto es porque al tener un valor preciso de la temperatura de cielo en el lugar se puede calcular la cantidad de energía por radiación que perderá el sistema y por lo tanto, cuánto va a descender la temperatura.

Además, en el mismo capítulo se describen algunas formas de optimizar estos sistemas de enfriamiento e incluso se describen sistemas de doble función, que enfrían en la noche y calientan en el día. Estos dispositivos tienen una gran ventaja por sobre los enfriadores radiativos simples porque la eficiencia de espacio, dinero, tiempo y materiales es un tema que importa cada vez más. Por lo tanto, un sistema de este tipo, con doble propósito, puede tener mucho más proyección que uno simple y los resultados son alentadores.

Las correlaciones numéricas también han demostrado ser un buen referente y en general tienen valores cercanos a los medidos por el sensor infrarrojo y a los calculados por el software EES. Se observa que las tendencias en general son similares. También resalta que ambas correlaciones son prácticamente idénticas en los gráficos siendo que sus fórmulas son completamente distintas (ver Tabla 1), siendo la ecuación de Berdahl y Martin bastante más compleja que la de Erico Frigerio.

Con lo expresado en los dos párrafos previos, se confirma que **se han cumplido a cabalidad los dos primeros objetivos específicos de este proyecto**, los cuales eran analizar el estado del arte tanto en las correlaciones numéricas como en los sistemas de enfriamiento radiativo. El detalle de esta información se encuentra en el Capítulo 4.

**Se cumple también el objetivo específico de crear un modelo numérico** que represente fielmente el sistema a implementar, como se observa en el Capítulo 5 y en los capítulos siguientes también se desarrollan exitosamente los objetivos relacionados con la selección de materiales, construcción del instrumento, toma de mediciones y comparación con las correlaciones.

En la parte práctica, **se ha cumplido el objetivo específico de seleccionar y adquirir los implementos con los que se construiría el sistema de medición y realizar la construcción del sistema**, esto se describe con detalle en el Capítulo 6. Y por último, **se cumple cabalmente con la medición de temperatura de cielo** utilizando este equipo y con el análisis de los resultados.

## 9. Anexos

$$\varepsilon + \rho + \tau = 1$$

Ecuación 7. Propiedades ópticas de un cuerpo.

$$\sigma_{medición} = \sqrt{\sigma_{medición}^2 + \sigma_{sensor}^2 + \sigma_{arduino}^2}$$

Ecuación 8. Error de instrumento.

$$\sigma_t = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Ecuación 9. Error de medición con “n” sensores, cada uno con un error “σ” [39]

$$V = I \cdot R$$

Ecuación 10. Ley de Ohm

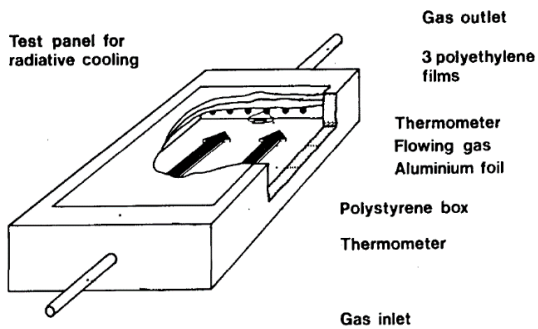


Ilustración 20. Diagrama del panel para pruebas de radiación de gas. Flechas indican sentido de circulación del flujo laminar. [21]

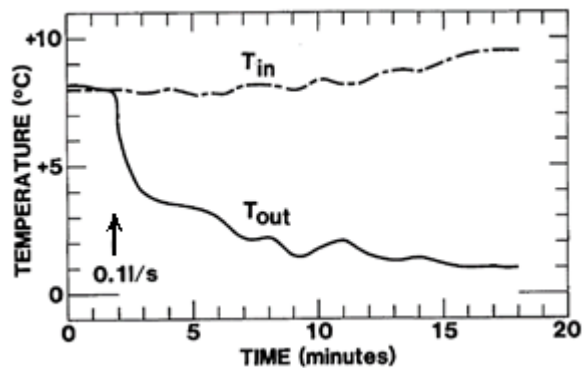


Ilustración 21. Gráfico de temperatura vs. tiempo. La flecha vertical indica el momento en que se inserta amoníaco al sistema un flujo de 0,1 l/seg. [21]

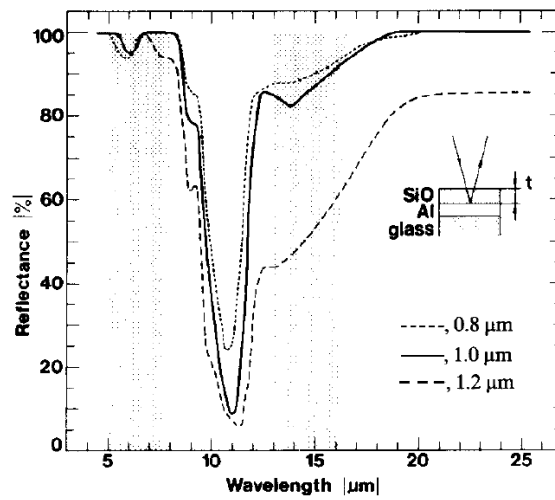


Ilustración 22. Reflectividad en función de la longitud de onda en superficies aluminio recubiertas con óxido de silicio con tres espesores distintos. [19]

Unit Settings: SI K kPa kJ mass deg

| Variable±Uncertainty              | Partial derivative                           | % of uncertainty |
|-----------------------------------|----------------------------------------------|------------------|
| $T_s = 254,893 \pm 1,695$ [K]     |                                              |                  |
| $H_r = 0,69 \pm 0,02002$ [-]      | $\partial T_s / \partial H_r = -5,096E-11$   | 0,00 %           |
| $i_{in} = 0,3945 \pm 0,0010$ [A]  | $\partial T_s / \partial i_{in} = -819,5396$ | 22,75 %          |
| $T_{amb} = 282,78 \pm 0,26$ [K]   | $\partial T_s / \partial T_{amb} = -5,17$    | 61,30 %          |
| $T_p = 329,48 \pm 0,08$ [K]       | $\partial T_s / \partial T_p = 7,43$         | 12,32 %          |
| $v_{in} = 29,3070 \pm 0,0293$ [V] | $\partial T_s / \partial v_{in} = -11,0325$  | 3,64 %           |

Ilustración 23. Tabla obtenida en EES de sensibilidad de factores medidos.



## Sistema utilizado en software EES:

"Temperatura de placa"

$$T_p = 329,4751 \text{ [K]}$$

"Temperatura ambiente"

$$T_{amb} = 282,78 \text{ [K]}$$

"Humedad relativa"

$$H_r = 0,69$$

"Temperatura medida con sensor IR Melexis"

$$T_{IR} = 258,15 \text{ [K]}$$

"ENTRADA DE CALOR EN LA PLACA CONSTANTE EN EL TIEMPO"

"Corriente de entrada"

$$i_{in} = 0,39453 \text{ [A]}$$

"Voltaje de entrada"

$$v_{in} = 29,307 \text{ [V]}$$

"Calor de entrada en placa"

$$Q_{dot\_in} = i_{in} * v_{in}$$

"CONDICIONES DEL EXPERIMENTO"

"Fluido del ambiente (aire)"

$$\text{Fluid\$} = \text{'air'}$$

"Temperatura de punto de rocío"

$$T_{dewpoint} = \text{dewpoint}(\text{AirH2O}; T=T_{amb}; R=H_r; P=P)$$

"Temperatura de cielo a partir de ecuación de Berdhal & Martin"

$$T_{s\_calc\_B\&M} = T_{amb} * (0,711 + 0,0056 \text{ [1/K]} * (T_{dewpoint} - 273,15 \text{ [K]}) + 0,000073 \text{ [1/K}^2] * (T_{dewpoint} - 273,15 \text{ [K]})^2 + 0,013 * \cos(15 * 5 \text{ [deg]}))^{(1/4)}$$

"Temperatura de cielo a partir de ecuación de Frigerio"

$$T_{s\_calc\_EF} = (0,69 * (T_{dewpoint} - 273,15 \text{ [K]}) - 18 \text{ [K]} + (T_{amb} - 273,15 \text{ [K]})) + 273,15 \text{ [K]}$$

"Presión atmosférica"

$$P = 94,99 \text{ [kPa]}$$

"-----"

"PARÁMETROS"

"Dimensiones de placa"

$$Lar_{placa} = 0,11 \text{ [m]}$$

"Largo de la placa"

|                                           |                                   |
|-------------------------------------------|-----------------------------------|
| An_placa = 0,094 [m]                      | "Ancho de la placa"               |
| Alt_placa = 0,012 [m]                     | "Altura de la placa"              |
| c = alt_int_caja - dist_fondo - Alt_placa | "Distancia entre placa y agujero" |
| R_agujero = 0,095 [m]                     | "Radio del agujero"               |
| dist_fondo = 0,04 [m]                     | "Distancia entre fondo y placa"   |
| A_placa_1 = An_placa * Alt_placa          | "Área cara 1 de placa"            |
| A_placa_2 = Lar_placa * Alt_placa         | "Área cara 2 de placa"            |
| A_placa_3 = An_placa * Alt_placa          | "Área cara 3 de placa"            |
| A_placa_4 = Lar_placa * Alt_placa         | "Área cara 4 de placa"            |
| A_placa_5 = Lar_placa * An_placa          | "Área cara 5 de placa"            |
| A_placa_6 = Lar_placa * An_placa          | "Área cara 6 de placa"            |

#### "Dimensiones de caja"

|                                              |                              |
|----------------------------------------------|------------------------------|
| alt_ext_caja = 0,470 [m]                     | "Altura exterior de la caja" |
| ancho_ext_caja = 0,43 [m]                    | "Ancho exterior de la caja"  |
| largo_ext_caja = 0,81 [m]                    | "Largo exterior de la caja"  |
| alt_int_caja = alt_ext_caja - 2*esp_caja     | "Altura interior de la caja" |
| ancho_int_caja = ancho_ext_caja - 2*esp_caja | "Ancho interior de la caja"  |
| largo_int_caja = largo_ext_caja - 2*esp_caja | "Largo interior de la caja"  |
| esp_caja = 0,05 [m]                          | "Espesor paredes de caja"    |

#### "Coeficiente de convección h, números de Nusselt y de Rayleigh del aire interior sobre la placa"

Call fc\_plate\_horizontal1(Fluid\$ ; T\_p ; T\_aire\_in; P; L\_carac\_placa: h\_placa; Nu\_placa; Ra\_placa)

#### "Largo característico de la placa (área/perímetro)"

$L\_carac\_placa = (Lar\_placa * An\_placa) / (2 * Lar\_placa + 2 * An\_placa)$

#### "Constante de Stefan-Boltzmann"

sigma = sigma#

#### "Emisividad de materiales"

|                |                                                                     |
|----------------|---------------------------------------------------------------------|
| E_p = 0,65     | "Emisividad del material de la placa (Cobre)"                       |
| E_w_int = 0,97 | "Emisividad de material de las paredes interiores (Lana de vidrio)" |
| E_w_ext = 0,97 | "Emisividad de las paredes exteriores (Plástico)"                   |

#### "Conductividad recubrimiento de interior de caja de lana de vidrio"

$k\_aislante = 0,0001 * (T\_w\_in\_2 - 273,15) + 0,031$

#### "Superficies exterior e interior de la caja"

|                                                                                                                                                        |                       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| $S\_int = 2 * alt\_int\_caja * ancho\_int\_caja + 2 * alt\_int\_caja * largo\_int\_caja + 2 * ancho\_int\_caja * largo\_int\_caja - pi * R\_agujero^2$ | "Superficie interior" |
| $S\_ext = 2 * alt\_ext\_caja * ancho\_ext\_caja + 2 * alt\_ext\_caja * largo\_ext\_caja + 2 * ancho\_ext\_caja * largo\_ext\_caja - pi * R\_agujero^2$ | "Superficie exterior" |

#### "FACTORES DE VISIÓN"

##### "Factor de visión por radiación desde la parte superior de la placa (6) hacia el agujero circular (7)"

$F[6;7] = F3D\_21(Lar\_placa; An\_placa; c; R\_agujero; 0)$

"Factor de visión desde parte superior de la placa (6) hacia techo de caja (6) (factor de visión entre caras menos factor de visión hacia agujero)"

$$F[6;6] = F3D\_14((\text{ancho\_int\_caja}/2) - (\text{An\_placa}/2); (\text{ancho\_int\_caja} + \text{An\_placa})/2; (\text{largo\_int\_caja}/2) - (\text{Lar\_placa}/2); (\text{largo\_int\_caja} + \text{Lar\_placa})/2; 0; \text{ancho\_int\_caja}; 0; \text{largo\_int\_caja}; c) - F[6;7]$$

"Factor de visión desde parte superior de placa (6) hacia lados interiores de caja"

$$F[6;1] = 2 * F3D\_13((\text{largo\_int\_caja} - \text{Lar\_placa})/2; \text{Lar\_placa}; 0,00001; c; (\text{ancho\_int\_caja} - \text{An\_placa})/2; 0,000001; \text{An\_placa}) + F3D\_11((\text{largo\_int\_caja} - \text{Lar\_placa})/2; \text{Lar\_placa}; 0,00001; c; \text{An\_placa})$$

$$F[6;3] = 2 * F3D\_13((\text{largo\_int\_caja} - \text{Lar\_placa})/2; \text{Lar\_placa}; 0,00001; c; (\text{ancho\_int\_caja} - \text{An\_placa})/2; 0,000001; \text{An\_placa}) + F3D\_11((\text{largo\_int\_caja} - \text{Lar\_placa})/2; \text{Lar\_placa}; 0,00001; c; \text{An\_placa})$$

$$F[6;2] = 2 * F3D\_13((\text{ancho\_int\_caja} - \text{An\_placa})/2; \text{An\_placa}; 0,000001; c; (\text{largo\_int\_caja} - \text{Lar\_placa})/2; 0,000001; \text{Lar\_placa}) + F3D\_11((\text{ancho\_int\_caja} - \text{An\_placa})/2; \text{An\_placa}; 0,00001; c; \text{Lar\_placa})$$

$$F[6;4] = 2 * F3D\_13((\text{ancho\_int\_caja} - \text{An\_placa})/2; \text{An\_placa}; 0,000001; c; (\text{largo\_int\_caja} - \text{Lar\_placa})/2; 0,000001; \text{Lar\_placa}) + F3D\_11((\text{ancho\_int\_caja} - \text{An\_placa})/2; \text{An\_placa}; 0,00001; c; \text{Lar\_placa})$$

$$F\_sup = F[6;1] + F[6;2] + F[6;3] + F[6;4] + F[6;6] + F[6;7] \text{ "}=1"$$

"Factor de visión desde parte inferior (5) de la placa hacia base de caja (5)"

$$F[5;5] = F3D\_14((\text{ancho\_int\_caja}/2) - (\text{An\_placa}/2); (\text{ancho\_int\_caja} + \text{An\_placa})/2; (\text{largo\_int\_caja}/2) - (\text{Lar\_placa}/2); (\text{largo\_int\_caja} + \text{Lar\_placa})/2; 0; \text{ancho\_int\_caja}; 0; \text{largo\_int\_caja}; \text{dist\_fondo})$$

"Factor de visión desde parte inferior de placa hacia lados interiores de caja"

$$F[5;1] = 2 * F3D\_13((\text{largo\_int\_caja} - \text{Lar\_placa})/2; \text{Lar\_placa}; 0,00001; \text{dist\_fondo}; (\text{ancho\_int\_caja} - \text{An\_placa})/2; 0,00001; \text{An\_placa}) + F3D\_11((\text{largo\_int\_caja} - \text{Lar\_placa})/2; \text{Lar\_placa}; 0,00001; \text{dist\_fondo}; \text{An\_placa})$$

$$F[5;3] = 2 * F3D\_13((\text{largo\_int\_caja} - \text{Lar\_placa})/2; \text{Lar\_placa}; 0,00001; \text{dist\_fondo}; (\text{ancho\_int\_caja} - \text{An\_placa})/2; 0,00001; \text{An\_placa}) + F3D\_11((\text{largo\_int\_caja} - \text{Lar\_placa})/2; \text{Lar\_placa}; 0,00001; \text{dist\_fondo}; \text{An\_placa})$$

$$F[5;2] = 2 * F3D\_13((\text{ancho\_int\_caja} - \text{An\_placa})/2; \text{An\_placa}; 0,00001; \text{dist\_fondo}; (\text{largo\_int\_caja} - \text{Lar\_placa})/2; 0,000001; \text{Lar\_placa}) + F3D\_11((\text{ancho\_int\_caja} - \text{An\_placa})/2; \text{An\_placa}; 0,00001; \text{dist\_fondo}; \text{Lar\_placa})$$

$$F[5;4] = 2 * F3D\_13((\text{ancho\_int\_caja} - \text{An\_placa})/2; \text{An\_placa}; 0,00001; \text{dist\_fondo}; (\text{largo\_int\_caja} - \text{Lar\_placa})/2; 0,000001; \text{Lar\_placa}) + F3D\_11((\text{ancho\_int\_caja} - \text{An\_placa})/2; \text{An\_placa}; 0,00001; \text{dist\_fondo}; \text{Lar\_placa})$$

$$F\_inf = F[5;1] + F[5;2] + F[5;3] + F[5;4] + F[5;5] \text{ "}=1"$$

"Factor de visión desde cara larga de placa (2 y 4) hacia lados interiores de caja"

$$F[2;1] = F3D\_13((\text{largo\_int\_caja} - \text{Lar\_placa})/2; \text{Lar\_placa}; 0,000001; (\text{ancho\_int\_caja} - \text{An\_placa})/2; \text{alt\_int\_caja} - \text{Alt\_placa} - \text{dist\_fondo}; 0,000001; \text{Alt\_placa}) + F3D\_11((\text{largo\_int\_caja} - \text{Lar\_placa})/2; \text{Lar\_placa}; 0,000001; (\text{ancho\_int\_caja} - \text{An\_placa})/2; \text{Alt\_placa})$$

$$F[2;2] = F3D\_14((\text{largo\_int\_caja} - \text{Lar\_placa})/2; (\text{largo\_int\_caja} + \text{Lar\_placa})/2; \text{dist\_fondo}; \text{dist\_fondo} + \text{Alt\_placa}; 0; \text{largo\_int\_caja}; 0; \text{alt\_int\_caja}; (\text{ancho\_int\_caja} - \text{An\_placa})/2)$$



$F[3;3] = F3D\_14((\text{ancho\_int\_caja} - \text{An\_placa})/2; (\text{ancho\_int\_caja} + \text{An\_placa})/2; \text{dist\_fondo}; \text{dist\_fondo} + \text{Alt\_placa}; 0; \text{ancho\_int\_caja}; 0; \text{alt\_int\_caja}; (\text{largo\_int\_caja} - \text{Lar\_placa})/2)$   
 $F[3;4] = F3D\_13((\text{ancho\_int\_caja} - \text{An\_placa})/2; \text{An\_placa}; 0,000001; c; (\text{largo\_int\_caja} - \text{Lar\_placa})/2; 0,000001; \text{Alt\_placa}) + F3D\_11((\text{ancho\_int\_caja} - \text{An\_placa})/2; \text{An\_placa}; 0,000001; (\text{largo\_int\_caja} - \text{Lar\_placa})/2; \text{Alt\_placa}) + F3D\_13((\text{ancho\_int\_caja} - \text{An\_placa})/2; \text{An\_placa}; 0,000001; \text{dist\_fondo}; (\text{largo\_int\_caja} - \text{Lar\_placa})/2; 0,000001; \text{Alt\_placa})$   
 $F[3;5] = 2 * F3D\_13(\text{dist\_fondo}; \text{Alt\_placa}; 0,000001; (\text{largo\_int\_caja} - \text{Lar\_placa})/2; (\text{ancho\_int\_caja} - \text{An\_placa})/2; 0,000001; \text{An\_placa}) + F3D\_11(\text{dist\_fondo}; \text{Alt\_placa}; 0,000001; (\text{largo\_int\_caja} - \text{Lar\_placa})/2; \text{An\_placa})$   
 $F[3;6] = 2 * F3D\_13(c; \text{Alt\_placa}; 0,000001; (\text{largo\_int\_caja} - \text{Lar\_placa})/2; (\text{ancho\_int\_caja} - \text{An\_placa})/2; 0,000001; \text{An\_placa}) + F3D\_11(c; \text{Alt\_placa}; 0,000001; (\text{largo\_int\_caja} - \text{Lar\_placa})/2; \text{An\_placa})$   
 $F\_ancho = F[1;1] + F[1;2] + F[1;4] + F[1;5] + F[1;6] \text{ "}=1"$   
 $F\_ancho2 = F[3;3] + F[3;2] + F[3;4] + F[3;5] + F[3;6] \text{ "}=1"$

#### "Factores de visión entre lados interiores de caja"

##### "Factor de visión desde cara lateral 1"

$F2[1;2] = f3d\_2(\text{ancho\_int\_caja}; \text{largo\_int\_caja}; \text{alt\_int\_caja})$   
 $F2[1;3] = f3d\_1(\text{ancho\_int\_caja}; \text{alt\_int\_caja}; \text{largo\_int\_caja})$   
 $F2[1;4] = f3d\_2(\text{ancho\_int\_caja}; \text{largo\_int\_caja}; \text{alt\_int\_caja})$   
 $F2[1;5] = f3d\_2(\text{alt\_int\_caja}; \text{largo\_int\_caja}; \text{ancho\_int\_caja})$   
 $F2[1;6] = f3d\_2(\text{alt\_int\_caja}; \text{largo\_int\_caja}; \text{ancho\_int\_caja})$

$F2\_1 = F2[1;2] + F2[1;3] + F2[1;4] + F2[1;5] + F2[1;6] \text{ "}=1"$

##### "Factor de visión desde cara lateral 2"

$F2[2;1] = f3d\_2(\text{largo\_int\_caja}; \text{ancho\_int\_caja}; \text{alt\_int\_caja})$   
 $F2[2;3] = f3d\_2(\text{largo\_int\_caja}; \text{ancho\_int\_caja}; \text{alt\_int\_caja})$   
 $F2[2;4] = f3d\_1(\text{largo\_int\_caja}; \text{alt\_int\_caja}; \text{ancho\_int\_caja})$   
 $F2[2;5] = f3d\_2(\text{alt\_int\_caja}; \text{ancho\_int\_caja}; \text{largo\_int\_caja})$   
 $F2[2;6] = f3d\_2(\text{alt\_int\_caja}; \text{ancho\_int\_caja}; \text{largo\_int\_caja})$

$F2\_2 = F2[2;1] + F2[2;3] + F2[2;4] + F2[2;5] + F2[2;6] \text{ "}=1"$

##### "Factor de visión desde cara lateral 3"

$F2[3;1] = f3d\_1(\text{ancho\_int\_caja}; \text{alt\_int\_caja}; \text{largo\_int\_caja})$   
 $F2[3;2] = f3d\_2(\text{ancho\_int\_caja}; \text{largo\_int\_caja}; \text{alt\_int\_caja})$   
 $F2[3;4] = f3d\_2(\text{ancho\_int\_caja}; \text{largo\_int\_caja}; \text{alt\_int\_caja})$   
 $F2[3;5] = f3d\_2(\text{alt\_int\_caja}; \text{largo\_int\_caja}; \text{ancho\_int\_caja})$   
 $F2[3;6] = f3d\_2(\text{alt\_int\_caja}; \text{largo\_int\_caja}; \text{ancho\_int\_caja})$

$F2\_3 = F2[3;1] + F2[3;2] + F2[3;4] + F2[3;5] + F2[3;6] \text{ "}=1"$

##### "Factor de visión desde cara lateral 4"

$F2[4;1] = f3d\_2(\text{largo\_int\_caja}; \text{ancho\_int\_caja}; \text{alt\_int\_caja})$   
 $F2[4;2] = f3d\_1(\text{largo\_int\_caja}; \text{alt\_int\_caja}; \text{ancho\_int\_caja})$

$F2[4;3] = f3d\_2(largo\_int\_caja; ancho\_int\_caja; alt\_int\_caja)$   
 $F2[4;5] = f3d\_2(alt\_int\_caja; ancho\_int\_caja; largo\_int\_caja)$   
 $F2[4;6] = f3d\_2(alt\_int\_caja; ancho\_int\_caja; largo\_int\_caja)$

$F2\_4 = F2[4;1] + F2[4;2] + F2[4;3] + F2[4;5] + F2[4;6] \text{ "=1"}$

"Factor de visión desde cara inferior 5"

$F2[5;1] = f3d\_2(largo\_int\_caja; alt\_int\_caja; ancho\_int\_caja)$   
 $F2[5;2] = f3d\_2(ancho\_int\_caja; alt\_int\_caja; largo\_int\_caja)$   
 $F2[5;3] = f3d\_2(largo\_int\_caja; alt\_int\_caja; ancho\_int\_caja)$   
 $F2[5;4] = f3d\_2(ancho\_int\_caja; alt\_int\_caja; largo\_int\_caja)$   
 $F2[5;6] = F3D\_1(ancho\_int\_caja; largo\_int\_caja; alt\_int\_caja) -$   
 $F3D\_21(largo\_int\_caja; ancho\_int\_caja; dist\_fondo; R\_agujero; 0)$   
 $F2[5;7] = F3D\_21(largo\_int\_caja; ancho\_int\_caja; dist\_fondo; R\_agujero; 0)$

$F2\_5 = F2[5;1] + F2[5;2] + F2[5;3] + F2[5;4] + F2[5;6] + F2[5;7] \text{ "=1"}$

"Factor de visión desde cara superior 6"

$F2[6;1] = f3d\_2(largo\_int\_caja; alt\_int\_caja; ancho\_int\_caja)$   
 $F2[6;2] = f3d\_2(ancho\_int\_caja; alt\_int\_caja; largo\_int\_caja)$   
 $F2[6;3] = f3d\_2(largo\_int\_caja; alt\_int\_caja; ancho\_int\_caja)$   
 $F2[6;4] = f3d\_2(ancho\_int\_caja; alt\_int\_caja; largo\_int\_caja)$   
 $F2[6;5] = F3D\_1(ancho\_int\_caja; largo\_int\_caja; alt\_int\_caja) -$   
 $F3D\_21(largo\_int\_caja; ancho\_int\_caja; c; R\_agujero; 0)$

$F2\_6 = F2[6;1] + F2[6;2] + F2[6;3] + F2[6;4] + F2[6;5] \text{ "=1"}$

"-----"

"Emisión de calor por radiación desde cada cara de placa hacia el cielo y hacia paredes"

"Emisión de radiación desde toda la placa hacia el agujero"

$Q\_dot\_rad\_placa\_cielo = A\_placa\_6 * F[6;7] * E\_p * sigma * (T\_p^4 - T\_s^4)$

"Emisión de radiación desde toda la placa hacia pared 1"

$Q\_dot\_rad\_placa\_1 = A\_placa\_1 * sigma * E\_p * F[1;1] * (T\_p^4 - T\_w\_in\_1^4) + A\_placa\_2 * E\_p$   
 $* sigma * F[2;1] * (T\_p^4 - T\_w\_in\_1^4) + A\_placa\_4 * E\_p * sigma * F[4;1] * (T\_p^4 -$   
 $T\_w\_in\_1^4) + A\_placa\_5 * E\_p * sigma * F[5;1] * (T\_p^4 - T\_w\_in\_1^4) + A\_placa\_6 * E\_p * sigma$   
 $* F[6;1] * (T\_p^4 - T\_w\_in\_1^4)$

"Emisión de radiación desde toda la placa hacia pared 2"

$Q\_dot\_rad\_placa\_2 = A\_placa\_2 * E\_p * sigma * F[2;2] * (T\_p^4 - T\_w\_in\_2^4) + A\_placa\_1 * sigma$   
 $* E\_p * F[1;2] * (T\_p^4 - T\_w\_in\_2^4) + A\_placa\_3 * sigma * E\_p * F[3;2] * (T\_p^4 - T\_w\_in\_2^4) +$   
 $A\_placa\_5 * E\_p * sigma * F[5;2] * (T\_p^4 - T\_w\_in\_2^4) + A\_placa\_6 * E\_p * sigma * F[6;2] *$   
 $(T\_p^4 - T\_w\_in\_2^4)$

"Emisión de radiación desde toda la placa hacia pared 3"

$$Q_{\text{dot\_rad\_placa\_3}} = A_{\text{placa\_3}} * \sigma * E_p * F[3;3] * (T_p^4 - T_{w\_in\_3}^4) + A_{\text{placa\_2}} * E_p * \sigma * F[2;3] * (T_p^4 - T_{w\_in\_3}^4) + A_{\text{placa\_4}} * E_p * \sigma * F[4;3] * (T_p^4 - T_{w\_in\_3}^4) + A_{\text{placa\_5}} * E_p * \sigma * F[5;3] * (T_p^4 - T_{w\_in\_3}^4) + A_{\text{placa\_6}} * E_p * \sigma * F[6;3] * (T_p^4 - T_{w\_in\_3}^4)$$

"Emisión de radiación desde toda la placa hacia pared 4"

$$Q_{\text{dot\_rad\_placa\_4}} = A_{\text{placa\_4}} * E_p * \sigma * F[4;4] * (T_p^4 - T_{w\_in\_4}^4) + A_{\text{placa\_1}} * \sigma * E_p * F[1;4] * (T_p^4 - T_{w\_in\_4}^4) + A_{\text{placa\_3}} * \sigma * E_p * F[3;4] * (T_p^4 - T_{w\_in\_4}^4) + A_{\text{placa\_5}} * E_p * \sigma * F[5;4] * (T_p^4 - T_{w\_in\_4}^4) + A_{\text{placa\_6}} * E_p * \sigma * F[6;4] * (T_p^4 - T_{w\_in\_4}^4)$$

"Emisión de radiación desde toda la placa hacia pared 5"

$$Q_{\text{dot\_rad\_placa\_5}} = A_{\text{placa\_5}} * \sigma * E_p * F[5;5] * (T_p^4 - T_{w\_in\_5}^4) + A_{\text{placa\_2}} * F[2;5] * \sigma * E_p * (T_p^4 - T_{w\_in\_5}^4) + A_{\text{placa\_4}} * F[4;5] * \sigma * E_p * (T_p^4 - T_{w\_in\_5}^4) + A_{\text{placa\_1}} * F[1;5] * \sigma * E_p * (T_p^4 - T_{w\_in\_5}^4) + A_{\text{placa\_3}} * F[3;5] * \sigma * E_p * (T_p^4 - T_{w\_in\_5}^4)$$

"Emisión de radiación desde toda la placa hacia pared 6"

$$Q_{\text{dot\_rad\_placa\_6}} = A_{\text{placa\_6}} * \sigma * E_p * F[6;6] * (T_p^4 - T_{w\_in\_6}^4) + A_{\text{placa\_2}} * \sigma * E_p * F[2;6] * (T_p^4 - T_{w\_in\_6}^4) + A_{\text{placa\_4}} * \sigma * E_p * F[4;6] * (T_p^4 - T_{w\_in\_6}^4) + A_{\text{placa\_1}} * \sigma * E_p * F[1;6] * (T_p^4 - T_{w\_in\_6}^4) + A_{\text{placa\_3}} * \sigma * E_p * F[3;6] * (T_p^4 - T_{w\_in\_6}^4)$$

"Calor transmitido por convección desde la placa hacia el aire dentro de la caja"

$$Q_{\text{dot\_conv\_placa}} = (A_{\text{placa\_1}} + A_{\text{placa\_2}} + A_{\text{placa\_3}} + A_{\text{placa\_4}} + A_{\text{placa\_5}} + A_{\text{placa\_6}}) * h_{\text{placa}} * (T_p - T_{\text{aire\_in}})$$

"BALANCE DE PLACA"

$$Q_{\text{dot\_in}} = Q_{\text{dot\_rad\_placa\_cielo}} + Q_{\text{dot\_rad\_placa\_1}} + Q_{\text{dot\_rad\_placa\_2}} + Q_{\text{dot\_rad\_placa\_3}} + Q_{\text{dot\_rad\_placa\_4}} + Q_{\text{dot\_rad\_placa\_5}} + Q_{\text{dot\_rad\_placa\_6}} + Q_{\text{dot\_conv\_placa}}$$

"Área de paredes interiores de caja"

$$\begin{aligned} A_{\text{int\_caja}[1]} &= \text{alt\_int\_caja} * \text{ancho\_int\_caja} \\ A_{\text{int\_caja}[2]} &= \text{alt\_int\_caja} * \text{largo\_int\_caja} \\ A_{\text{int\_caja}[3]} &= \text{alt\_int\_caja} * \text{ancho\_int\_caja} \\ A_{\text{int\_caja}[4]} &= \text{alt\_int\_caja} * \text{largo\_int\_caja} \\ A_{\text{int\_caja}[5]} &= \text{largo\_int\_caja} * \text{ancho\_int\_caja} \\ A_{\text{int\_caja}[6]} &= \text{largo\_int\_caja} * \text{ancho\_int\_caja} - \pi * R_{\text{agujero}}^2 \end{aligned}$$

"Área de paredes exteriores de caja"

$$\begin{aligned} A_{\text{ext\_caja}[1]} &= \text{alt\_ext\_caja} * \text{ancho\_ext\_caja} \\ A_{\text{ext\_caja}[2]} &= \text{alt\_ext\_caja} * \text{largo\_ext\_caja} \\ A_{\text{ext\_caja}[3]} &= \text{alt\_ext\_caja} * \text{ancho\_ext\_caja} \\ A_{\text{ext\_caja}[4]} &= \text{alt\_ext\_caja} * \text{largo\_ext\_caja} \\ A_{\text{ext\_caja}[5]} &= \text{largo\_ext\_caja} * \text{ancho\_ext\_caja} \\ A_{\text{ext\_caja}[6]} &= \text{largo\_ext\_caja} * \text{ancho\_ext\_caja} - \pi * R_{\text{agujero}}^2 \end{aligned}$$

"Largo característico de paredes interiores de caja"

$$\begin{aligned}
L_{\text{caja\_int}[1]} &= A_{\text{int\_caja}[1]} / (2 * \text{alt\_int\_caja} + 2 * \text{ancho\_int\_caja}) \\
L_{\text{caja\_int}[2]} &= A_{\text{int\_caja}[2]} / (2 * \text{alt\_int\_caja} + 2 * \text{largo\_int\_caja}) \\
L_{\text{caja\_int}[3]} &= A_{\text{int\_caja}[3]} / (2 * \text{alt\_int\_caja} + 2 * \text{ancho\_int\_caja}) \\
L_{\text{caja\_int}[4]} &= A_{\text{int\_caja}[4]} / (2 * \text{alt\_int\_caja} + 2 * \text{largo\_int\_caja}) \\
L_{\text{caja\_int}[5]} &= A_{\text{int\_caja}[5]} / (2 * \text{largo\_int\_caja} + 2 * \text{ancho\_int\_caja}) \\
L_{\text{caja\_int}[6]} &= A_{\text{int\_caja}[6]} / (2 * \text{largo\_int\_caja} + 2 * \text{ancho\_int\_caja})
\end{aligned}$$

#### "Largo característico de paredes exteriores de caja"

$$\begin{aligned}
L_{\text{caja\_ext}[1]} &= A_{\text{ext\_caja}[1]} / (2 * \text{alt\_ext\_caja} + 2 * \text{ancho\_ext\_caja}) \\
L_{\text{caja\_ext}[2]} &= A_{\text{ext\_caja}[2]} / (2 * \text{alt\_ext\_caja} + 2 * \text{largo\_ext\_caja}) \\
L_{\text{caja\_ext}[3]} &= A_{\text{ext\_caja}[3]} / (2 * \text{alt\_ext\_caja} + 2 * \text{ancho\_ext\_caja}) \\
L_{\text{caja\_ext}[4]} &= A_{\text{ext\_caja}[4]} / (2 * \text{alt\_ext\_caja} + 2 * \text{largo\_ext\_caja}) \\
L_{\text{caja\_ext}[5]} &= A_{\text{ext\_caja}[5]} / (2 * \text{largo\_ext\_caja} + 2 * \text{ancho\_ext\_caja}) \\
L_{\text{caja\_ext}[6]} &= A_{\text{ext\_caja}[6]} / (2 * \text{largo\_ext\_caja} + 2 * \text{ancho\_ext\_caja})
\end{aligned}$$

#### "Radiación entre paredes internas de caja"

##### "Radiación recibida por pared 1 desde otras paredes"

$$\begin{aligned}
Q_{\text{dot\_rad}[2;1]} &= A_{\text{int\_caja}[2]} * E_{\text{w\_int}} * \sigma * F2[2;1] * (T_{\text{w\_in\_2}}^4 - T_{\text{w\_in\_1}}^4) \\
Q_{\text{dot\_rad}[3;1]} &= A_{\text{int\_caja}[3]} * E_{\text{w\_int}} * \sigma * F2[3;1] * (T_{\text{w\_in\_3}}^4 - T_{\text{w\_in\_1}}^4) \\
Q_{\text{dot\_rad}[4;1]} &= A_{\text{int\_caja}[4]} * E_{\text{w\_int}} * \sigma * F2[4;1] * (T_{\text{w\_in\_4}}^4 - T_{\text{w\_in\_1}}^4) \\
Q_{\text{dot\_rad}[5;1]} &= A_{\text{int\_caja}[5]} * E_{\text{w\_int}} * \sigma * F2[5;1] * (T_{\text{w\_in\_5}}^4 - T_{\text{w\_in\_1}}^4) \\
Q_{\text{dot\_rad}[6;1]} &= A_{\text{int\_caja}[6]} * E_{\text{w\_int}} * \sigma * F2[6;1] * (T_{\text{w\_in\_6}}^4 - T_{\text{w\_in\_1}}^4)
\end{aligned}$$

$$Q_{\text{dot\_rad\_caja\_1}} = Q_{\text{dot\_rad}[2;1]} + Q_{\text{dot\_rad}[3;1]} + Q_{\text{dot\_rad}[4;1]} + Q_{\text{dot\_rad}[5;1]} + Q_{\text{dot\_rad}[6;1]}$$

##### "Radiación recibida por pared 2 desde otras paredes"

$$\begin{aligned}
Q_{\text{dot\_rad}[1;2]} &= A_{\text{int\_caja}[1]} * E_{\text{w\_int}} * \sigma * F2[1;2] * (T_{\text{w\_in\_1}}^4 - T_{\text{w\_in\_2}}^4) \\
Q_{\text{dot\_rad}[3;2]} &= A_{\text{int\_caja}[3]} * E_{\text{w\_int}} * \sigma * F2[3;2] * (T_{\text{w\_in\_3}}^4 - T_{\text{w\_in\_2}}^4) \\
Q_{\text{dot\_rad}[4;2]} &= A_{\text{int\_caja}[4]} * E_{\text{w\_int}} * \sigma * F2[4;2] * (T_{\text{w\_in\_4}}^4 - T_{\text{w\_in\_2}}^4) \\
Q_{\text{dot\_rad}[5;2]} &= A_{\text{int\_caja}[5]} * E_{\text{w\_int}} * \sigma * F2[5;2] * (T_{\text{w\_in\_5}}^4 - T_{\text{w\_in\_2}}^4) \\
Q_{\text{dot\_rad}[6;2]} &= A_{\text{int\_caja}[6]} * E_{\text{w\_int}} * \sigma * F2[6;2] * (T_{\text{w\_in\_6}}^4 - T_{\text{w\_in\_2}}^4)
\end{aligned}$$

$$Q_{\text{dot\_rad\_caja\_2}} = Q_{\text{dot\_rad}[1;2]} + Q_{\text{dot\_rad}[3;2]} + Q_{\text{dot\_rad}[4;2]} + Q_{\text{dot\_rad}[5;2]} + Q_{\text{dot\_rad}[6;2]}$$

##### "Radiación recibida por pared 3 desde otras paredes"

$$\begin{aligned}
Q_{\text{dot\_rad}[1;3]} &= A_{\text{int\_caja}[1]} * E_{\text{w\_int}} * \sigma * F2[1;3] * (T_{\text{w\_in\_1}}^4 - T_{\text{w\_in\_3}}^4) \\
Q_{\text{dot\_rad}[2;3]} &= A_{\text{int\_caja}[2]} * E_{\text{w\_int}} * \sigma * F2[2;3] * (T_{\text{w\_in\_2}}^4 - T_{\text{w\_in\_3}}^4) \\
Q_{\text{dot\_rad}[4;3]} &= A_{\text{int\_caja}[4]} * E_{\text{w\_int}} * \sigma * F2[4;3] * (T_{\text{w\_in\_4}}^4 - T_{\text{w\_in\_3}}^4) \\
Q_{\text{dot\_rad}[5;3]} &= A_{\text{int\_caja}[5]} * E_{\text{w\_int}} * \sigma * F2[5;3] * (T_{\text{w\_in\_5}}^4 - T_{\text{w\_in\_3}}^4) \\
Q_{\text{dot\_rad}[6;3]} &= A_{\text{int\_caja}[6]} * E_{\text{w\_int}} * \sigma * F2[6;3] * (T_{\text{w\_in\_6}}^4 - T_{\text{w\_in\_3}}^4)
\end{aligned}$$

$$Q_{\text{dot\_rad\_caja\_3}} = Q_{\text{dot\_rad}[1;3]} + Q_{\text{dot\_rad}[2;3]} + Q_{\text{dot\_rad}[4;3]} + Q_{\text{dot\_rad}[5;3]} + Q_{\text{dot\_rad}[6;3]}$$

"Radiación recibida por pared 4 desde otras paredes"

$$\begin{aligned}Q_{\text{dot\_rad}}[1;4] &= A_{\text{int\_caja}}[1] * E_{\text{w\_int}} * \sigma * F2[1;4] * (T_{\text{w\_in\_1}}^4 - T_{\text{w\_in\_4}}^4) \\Q_{\text{dot\_rad}}[2;4] &= A_{\text{int\_caja}}[2] * E_{\text{w\_int}} * \sigma * F2[2;4] * (T_{\text{w\_in\_2}}^4 - T_{\text{w\_in\_4}}^4) \\Q_{\text{dot\_rad}}[3;4] &= A_{\text{int\_caja}}[3] * E_{\text{w\_int}} * \sigma * F2[3;4] * (T_{\text{w\_in\_3}}^4 - T_{\text{w\_in\_4}}^4) \\Q_{\text{dot\_rad}}[5;4] &= A_{\text{int\_caja}}[5] * E_{\text{w\_int}} * \sigma * F2[5;4] * (T_{\text{w\_in\_5}}^4 - T_{\text{w\_in\_4}}^4) \\Q_{\text{dot\_rad}}[6;4] &= A_{\text{int\_caja}}[6] * E_{\text{w\_int}} * \sigma * F2[6;4] * (T_{\text{w\_in\_6}}^4 - T_{\text{w\_in\_4}}^4)\end{aligned}$$

$$Q_{\text{dot\_rad\_caja\_4}} = Q_{\text{dot\_rad}}[1;4] + Q_{\text{dot\_rad}}[2;4] + Q_{\text{dot\_rad}}[3;4] + Q_{\text{dot\_rad}}[5;4] + Q_{\text{dot\_rad}}[6;4]$$

"Radiación recibida por pared 5 desde otras paredes"

$$\begin{aligned}Q_{\text{dot\_rad}}[1;5] &= A_{\text{int\_caja}}[1] * E_{\text{w\_int}} * \sigma * F2[1;5] * (T_{\text{w\_in\_1}}^4 - T_{\text{w\_in\_5}}^4) \\Q_{\text{dot\_rad}}[2;5] &= A_{\text{int\_caja}}[2] * E_{\text{w\_int}} * \sigma * F2[2;5] * (T_{\text{w\_in\_2}}^4 - T_{\text{w\_in\_5}}^4) \\Q_{\text{dot\_rad}}[3;5] &= A_{\text{int\_caja}}[3] * E_{\text{w\_int}} * \sigma * F2[3;5] * (T_{\text{w\_in\_3}}^4 - T_{\text{w\_in\_5}}^4) \\Q_{\text{dot\_rad}}[4;5] &= A_{\text{int\_caja}}[4] * E_{\text{w\_int}} * \sigma * F2[4;5] * (T_{\text{w\_in\_4}}^4 - T_{\text{w\_in\_5}}^4) \\Q_{\text{dot\_rad}}[6;5] &= A_{\text{int\_caja}}[6] * E_{\text{w\_int}} * \sigma * F2[6;5] * (T_{\text{w\_in\_6}}^4 - T_{\text{w\_in\_5}}^4)\end{aligned}$$

$$Q_{\text{dot\_rad\_caja\_5}} = Q_{\text{dot\_rad}}[1;5] + Q_{\text{dot\_rad}}[2;5] + Q_{\text{dot\_rad}}[3;5] + Q_{\text{dot\_rad}}[4;5] + Q_{\text{dot\_rad}}[6;5]$$

"Radiación recibida por pared 6 desde otras paredes"

$$\begin{aligned}Q_{\text{dot\_rad}}[1;6] &= A_{\text{int\_caja}}[1] * E_{\text{w\_int}} * \sigma * F2[1;6] * (T_{\text{w\_in\_1}}^4 - T_{\text{w\_in\_6}}^4) \\Q_{\text{dot\_rad}}[2;6] &= A_{\text{int\_caja}}[2] * E_{\text{w\_int}} * \sigma * F2[2;6] * (T_{\text{w\_in\_2}}^4 - T_{\text{w\_in\_6}}^4) \\Q_{\text{dot\_rad}}[3;6] &= A_{\text{int\_caja}}[3] * E_{\text{w\_int}} * \sigma * F2[3;6] * (T_{\text{w\_in\_3}}^4 - T_{\text{w\_in\_6}}^4) \\Q_{\text{dot\_rad}}[4;6] &= A_{\text{int\_caja}}[4] * E_{\text{w\_int}} * \sigma * F2[4;6] * (T_{\text{w\_in\_4}}^4 - T_{\text{w\_in\_6}}^4) \\Q_{\text{dot\_rad}}[5;6] &= A_{\text{int\_caja}}[5] * E_{\text{w\_int}} * \sigma * F2[5;6] * (T_{\text{w\_in\_5}}^4 - T_{\text{w\_in\_6}}^4)\end{aligned}$$

$$Q_{\text{dot\_rad\_caja\_6}} = Q_{\text{dot\_rad}}[1;6] + Q_{\text{dot\_rad}}[2;6] + Q_{\text{dot\_rad}}[3;6] + Q_{\text{dot\_rad}}[4;6] + Q_{\text{dot\_rad}}[5;6]$$

"Coeficiente de convección h, números de Nusselt y de Rayleigh del aire interno sobre caja"

```
Call fc_plate_vertical(Fluid$ ; T_w_in_1; T_aire_in; P; L_caja_int[1] : h_caja_in[1]; Nu_caja_in[1]; Ra_caja_in[1])
Call fc_plate_vertical(Fluid$ ; T_w_in_2; T_aire_in; P; L_caja_int[2] : h_caja_in[2]; Nu_caja_in[2]; Ra_caja_in[2])
Call fc_plate_vertical(Fluid$ ; T_w_in_3; T_aire_in; P; L_caja_int[3] : h_caja_in[3]; Nu_caja_in[3]; Ra_caja_in[3])
Call fc_plate_vertical(Fluid$ ; T_w_in_4; T_aire_in; P; L_caja_int[4] : h_caja_in[4]; Nu_caja_in[4]; Ra_caja_in[4])
Call fc_plate_vertical(Fluid$ ; T_w_in_5; T_aire_in; P; L_caja_int[5] : h_caja_in[5]; Nu_caja_in[5]; Ra_caja_in[5])
Call fc_plate_vertical(Fluid$ ; T_w_in_6; T_aire_in; P; L_caja_int[6] : h_caja_in[6]; Nu_caja_in[6]; Ra_caja_in[6])
```

"Coeficiente de convección h, números de Nusselt y de Rayleigh del aire externo sobre caja"

Call fc\_plate\_vertical(Fluid\$ ; T\_w\_ext\_1; T\_amb; P; L\_caja\_ext[1] : h\_caja\_ext[1]; Nu\_caja\_ext[1];  
 Ra\_caja\_ext[1])  
 Call fc\_plate\_vertical(Fluid\$ ; T\_w\_ext\_2; T\_amb; P; L\_caja\_ext[2] : h\_caja\_ext[2]; Nu\_caja\_ext[2];  
 Ra\_caja\_ext[2])  
 Call fc\_plate\_vertical(Fluid\$ ; T\_w\_ext\_3; T\_amb; P; L\_caja\_ext[3] : h\_caja\_ext[3]; Nu\_caja\_ext[3];  
 Ra\_caja\_ext[3])  
 Call fc\_plate\_vertical(Fluid\$ ; T\_w\_ext\_4; T\_amb; P; L\_caja\_ext[4] : h\_caja\_ext[4]; Nu\_caja\_ext[4];  
 Ra\_caja\_ext[4])  
 Call fc\_plate\_vertical(Fluid\$ ; T\_w\_ext\_5; T\_amb; P; L\_caja\_ext[5] : h\_caja\_ext[5]; Nu\_caja\_ext[5];  
 Ra\_caja\_ext[5])  
 Call fc\_plate\_vertical(Fluid\$ ; T\_w\_ext\_6; T\_amb; P; L\_caja\_ext[6] : h\_caja\_ext[6]; Nu\_caja\_ext[6];  
 Ra\_caja\_ext[6])

"Transferencia de calor por convección entre superficies y aire interior (por caras)"

$Q_{dot\_conv\_int[1]} = h_{caja\_in[1]} * A_{int\_caja[1]} * (T_{aire\_in} - T_{w\_in\_1})$   
 $Q_{dot\_conv\_int[2]} = h_{caja\_in[2]} * A_{int\_caja[2]} * (T_{aire\_in} - T_{w\_in\_2})$   
 $Q_{dot\_conv\_int[3]} = h_{caja\_in[3]} * A_{int\_caja[3]} * (T_{aire\_in} - T_{w\_in\_3})$   
 $Q_{dot\_conv\_int[4]} = h_{caja\_in[4]} * A_{int\_caja[4]} * (T_{aire\_in} - T_{w\_in\_4})$   
 $Q_{dot\_conv\_int[5]} = h_{caja\_in[5]} * A_{int\_caja[5]} * (T_{aire\_in} - T_{w\_in\_5})$   
 $Q_{dot\_conv\_int[6]} = h_{caja\_in[6]} * A_{int\_caja[6]} * (T_{aire\_in} - T_{w\_in\_6})$

"Conducción en caras de caja"

$Q_{dot\_cond\_caja\_1} = k_{aislante} * (A_{ext\_caja[1]} + A_{int\_caja[1]}) / 2 / esp\_caja * (T_{w\_in\_1} - T_{w\_ext\_1})$   
 $Q_{dot\_cond\_caja\_2} = k_{aislante} * (A_{ext\_caja[2]} + A_{int\_caja[2]}) / 2 / esp\_caja * (T_{w\_in\_2} - T_{w\_ext\_2})$   
 $Q_{dot\_cond\_caja\_3} = k_{aislante} * (A_{ext\_caja[3]} + A_{int\_caja[3]}) / 2 / esp\_caja * (T_{w\_in\_3} - T_{w\_ext\_3})$   
 $Q_{dot\_cond\_caja\_4} = k_{aislante} * (A_{ext\_caja[4]} + A_{int\_caja[4]}) / 2 / esp\_caja * (T_{w\_in\_4} - T_{w\_ext\_4})$   
 $Q_{dot\_cond\_caja\_5} = k_{aislante} * (A_{ext\_caja[5]} + A_{int\_caja[5]}) / 2 / esp\_caja * (T_{w\_in\_5} - T_{w\_ext\_5})$   
 $Q_{dot\_cond\_caja\_6} = k_{aislante} * (A_{ext\_caja[6]} + A_{int\_caja[6]}) / 2 / esp\_caja * (T_{w\_in\_6} - T_{w\_ext\_6})$

"BALANCE INTERIOR CAJA"

"Convección en las paredes interiores de caja es igual a convección de placa"

$Q_{dot\_conv\_placa} = Q_{dot\_conv\_int[1]} + Q_{dot\_conv\_int[2]} + Q_{dot\_conv\_int[3]} +$   
 $Q_{dot\_conv\_int[4]} + Q_{dot\_conv\_int[5]} + Q_{dot\_conv\_int[6]}$

"Calor por radiación y convección de paredes interiores es igual a conducción dentro de de la pared"

$Q_{dot\_conv\_int[1]} + Q_{dot\_rad\_caja\_1} + Q_{dot\_rad\_placa\_1} = Q_{dot\_cond\_caja\_1}$   
 $Q_{dot\_conv\_int[2]} + Q_{dot\_rad\_caja\_2} + Q_{dot\_rad\_placa\_2} = Q_{dot\_cond\_caja\_2}$   
 $Q_{dot\_conv\_int[3]} + Q_{dot\_rad\_caja\_3} + Q_{dot\_rad\_placa\_3} = Q_{dot\_cond\_caja\_3}$   
 $Q_{dot\_conv\_int[4]} + Q_{dot\_rad\_caja\_4} + Q_{dot\_rad\_placa\_4} = Q_{dot\_cond\_caja\_4}$   
 $Q_{dot\_conv\_int[5]} + Q_{dot\_rad\_caja\_5} + Q_{dot\_rad\_placa\_5} = Q_{dot\_cond\_caja\_5}$   
 $Q_{dot\_conv\_int[6]} + Q_{dot\_rad\_caja\_6} + Q_{dot\_rad\_placa\_6} = Q_{dot\_cond\_caja\_6}$

"Transferencia de calor por convección entre superficies y aire exterior (por caras)"

$$\begin{aligned}Q_{\text{dot\_conv\_ext}}[1] &= h_{\text{caja\_ext}}[1] * A_{\text{ext\_caja}}[1] * (T_{\text{w\_ext\_1}} - T_{\text{amb}}) \\Q_{\text{dot\_conv\_ext}}[2] &= h_{\text{caja\_ext}}[2] * A_{\text{ext\_caja}}[2] * (T_{\text{w\_ext\_2}} - T_{\text{amb}}) \\Q_{\text{dot\_conv\_ext}}[3] &= h_{\text{caja\_ext}}[3] * A_{\text{ext\_caja}}[3] * (T_{\text{w\_ext\_3}} - T_{\text{amb}}) \\Q_{\text{dot\_conv\_ext}}[4] &= h_{\text{caja\_ext}}[4] * A_{\text{ext\_caja}}[4] * (T_{\text{w\_ext\_4}} - T_{\text{amb}}) \\Q_{\text{dot\_conv\_ext}}[5] &= h_{\text{caja\_ext}}[5] * A_{\text{ext\_caja}}[5] * (T_{\text{w\_ext\_5}} - T_{\text{amb}}) \\Q_{\text{dot\_conv\_ext}}[6] &= h_{\text{caja\_ext}}[6] * A_{\text{ext\_caja}}[6] * (T_{\text{w\_ext\_6}} - T_{\text{amb}})\end{aligned}$$

"BALANCE EXTERIOR CAJA"

"Calor por radiación en exterior de paredes"

$$\begin{aligned}Q_{\text{dot\_rad\_amb}}[1] &= A_{\text{ext\_caja}}[1] * E_{\text{w\_ext}} * \sigma * (0,35 * (T_{\text{w\_ext\_1}}^4 - T_{\text{s}}^4) + 0,65 * (T_{\text{w\_ext\_1}}^4 - T_{\text{amb}}^4)) \\Q_{\text{dot\_rad\_amb}}[2] &= A_{\text{ext\_caja}}[2] * E_{\text{w\_ext}} * \sigma * (0,35 * (T_{\text{w\_ext\_2}}^4 - T_{\text{s}}^4) + 0,65 * (T_{\text{w\_ext\_2}}^4 - T_{\text{amb}}^4)) \\Q_{\text{dot\_rad\_amb}}[3] &= A_{\text{ext\_caja}}[3] * E_{\text{w\_ext}} * \sigma * (0,35 * (T_{\text{w\_ext\_3}}^4 - T_{\text{s}}^4) + 0,65 * (T_{\text{w\_ext\_3}}^4 - T_{\text{amb}}^4)) \\Q_{\text{dot\_rad\_amb}}[4] &= A_{\text{ext\_caja}}[4] * E_{\text{w\_ext}} * \sigma * (0,35 * (T_{\text{w\_ext\_4}}^4 - T_{\text{s}}^4) + 0,65 * (T_{\text{w\_ext\_4}}^4 - T_{\text{amb}}^4)) \\Q_{\text{dot\_rad\_amb}}[5] &= A_{\text{ext\_caja}}[5] * E_{\text{w\_ext}} * \sigma * (T_{\text{w\_ext\_5}}^4 - T_{\text{amb}}^4) \\Q_{\text{dot\_rad\_amb}}[6] &= A_{\text{ext\_caja}}[6] * E_{\text{w\_ext}} * \sigma * (0,85 * (T_{\text{w\_ext\_6}}^4 - T_{\text{s}}^4) + 0,15 * (T_{\text{w\_ext\_6}}^4 - T_{\text{amb}}^4))\end{aligned}$$

"Calor por radiación y convección de paredes exteriores es igual a conducción dentro de la pared"

$$\begin{aligned}Q_{\text{dot\_conv\_ext}}[1] + Q_{\text{dot\_rad\_amb}}[1] &= Q_{\text{dot\_cond\_caja\_1}} \\Q_{\text{dot\_conv\_ext}}[2] + Q_{\text{dot\_rad\_amb}}[2] &= Q_{\text{dot\_cond\_caja\_2}} \\Q_{\text{dot\_conv\_ext}}[3] + Q_{\text{dot\_rad\_amb}}[3] &= Q_{\text{dot\_cond\_caja\_3}} \\Q_{\text{dot\_conv\_ext}}[4] + Q_{\text{dot\_rad\_amb}}[4] &= Q_{\text{dot\_cond\_caja\_4}} \\Q_{\text{dot\_conv\_ext}}[5] + Q_{\text{dot\_rad\_amb}}[5] &= Q_{\text{dot\_cond\_caja\_5}} \\Q_{\text{dot\_conv\_ext}}[6] + Q_{\text{dot\_rad\_amb}}[6] &= Q_{\text{dot\_cond\_caja\_6}}\end{aligned}$$

## 10. Referencias

- [1] W. B. J: Duffie, «Solar Engineering of Thermal Processes,» Wiley, 2013, p. 148.
- [2] L. McCarthy, «NASA Goddard Institute for Space Studies,» NASA, 18 January 2016. [En línea]. Available: <https://www.giss.nasa.gov/research/news/20170118/>.
- [3] J. A. Berruezo y J. D. Jiménez, «Situación del Convenio Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático,» *Rev. de Salud Ambient.*, vol. 17, nº 1, pp. 34-39, 2017.
- [4] M. N. Bahadori, «Passive Cooling Systems in Iranian Architecture,» *Scientific American*, vol. 238, nº 2, pp. 144-154, 1978.
- [5] «Green Building Advisor,» 26 Mayo 2017. [En línea]. Available: <http://www.greenbuildingadvisor.com/articles/dept/musings/night-sky-radiation>.
- [6] W. B. J: Duffie, de *Solar Engineering of Thermal Processes*, Wiley, 2013, p. 6.
- [7] «Newport,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.newport.com/t/introduction-to-solar-radiation>. [Último acceso: 2018].

- [8] A. C. Sergi Vall, "Radiative cooling as low-grade energy source: A literature review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 77, no. Supplement C, pp. 803-820, 2017.
- [9] «Kip & Zonen CGR3 Pyrgeometer,» Kip & Zonen, [En línea]. Available: <http://www.kippzonen.com/Product/16/CGR3-Pyrgeometer#.WqfcnejOXIU>.
- [10] D. N. S. Algarni, «Survey of Sky Effective Temperature Models Applicable to Building Envelope Radiant heat Transfer,» ASHRAE, 2015.
- [11] L. K. D. E. B. Bokor, «Nocturnal Radiation: New Opportunity in Building Cooling,» *Energy Procedia*, vol. 112, pp. 118-125, 2017.
- [12] E. A. C. R. V. D. P. I. Cooper, «A Method Of Measuring Sky Temperature,» *Solar Energy*, vol. 26, n° 2, pp. 153-159, 1981.
- [13] A. G. G. S. D. C. J. Castro, «A method to measure total atmospheric long-wave downwelling radiation using a low cost infrared thermometer tilted to the vertical,» *Energy*, vol. 81, pp. 233-244, 2014.
- [14] C. L. V.R. Morris, «<https://www.arm.gov/>,» March 2006. [En línea]. Available: [https://www.arm.gov/publications/proceedings/conf16/extended\\_abs/morris\\_vr.pdf](https://www.arm.gov/publications/proceedings/conf16/extended_abs/morris_vr.pdf).

- [15] W. Y. Z. L. Cui Yong, «Performance Analysis On A Building-Integrated Solar Heating And Cooling Panel,» *Renewable Energy*, vol. 74, pp. 627-632, 2014.
- [16] G. P. L. L. R. Z. J. L. J. J. Mingke Hu, «Theoretical and Experimental Study of Spectral Selectivity Surface for Both Solar Heating and Radiative Cooling,» *International Journal of Photoenergy*, vol. 2015, n° 807875, pp. 1-8, 2015.
- [17] A. Hjortsberg y C. G. Granqvist, «Infrared optical properties of silicon monoxide films,» *Applied Optics*, vol. 19, n° 10, pp. 1694-1696, 1980.
- [18] A. H. C.G. Granqvist, «Radiative cooling to low temperatures: General considerations and application to selectively emitting SiO films,» *Journal of Applied Physics*, vol. 52, n° 6, pp. 4205-4219, 1981.
- [19] A. H. T. S. E. C. G. Granqvist, «Radiative Cooling To Low Temperatures With Selectively IR-Emitting Surfaces,» *Electronics & Optics*, vol. 90, pp. 187-190, 1982.
- [20] P. Berdahl, «Radiative cooling with MgO and/or LiF layers,» *Applied Optics*, vol. 23, n° 3, pp. 370-372, 1984.
- [21] C. G. G. E. Lushiku, «Radiative cooling with selectively infrared-emitting gases,» *Applied Optics*, vol. 23, n° 11, pp. 1835-1843, 1984.

- [22] J. F. R. V. A. Castellanos, «Enfriamiento de un Cuerpo Negro Radiante en Dirección del Espacio en el Desierto de Atacama,» Departamento de Mecánica, Universidad de Chile, Calama, Chile, 1972.
- [23] E. Frigerio, «Nuevas Medidas De Radiación Atmosférica En Salta,» *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 16, nº 11, pp. 31-38, 2012.
- [24] E. Frigerio, «Emisividad En EL N.O.A., Dependencia con la Altura,» UNSa, Salta, Argentina, 2000.
- [25] J. B. E. Frigerio, «Nuevos Estudios Sobre Radiación Nocturna En Cachi,» *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 10, nº 11, pp. 95-100, 2006.
- [26] E. Frigerio, «Sistema De Refrigeración Por Convección Natural, Nuevos Ensayos,» UNSa, Salta, Argentina, 1999.
- [27] E. Frigerio, «Nuevas Medidas De Radiación Atmosférica En Salta,» *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 16, nº 11, pp. 32-38, 2012.
- [28] E. Frigerio, «Diseño Solar Pasivo Optimo De Construcciones: Un Modelo Preliminar,» *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 5, nº 8, pp. 49-53, 2001.

- [29] T. E. L. G.-F. R. P.-S. M. T. I. Setién-Fernández, «Spectral emissivity of copper and nickel in the mid-infrared range between 250 and 900 C,» *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 71, n° 2014, pp. 549-554, 2013.
- [30] G. W. O. Madelung, Thermal Conductivity of Pure Metals and Alloys, Landolt-Börnstein, 1991.
- [31] A. G. J. Cengel, Transferencia de Calor y Masa, McGraw Hill, 2003, p. 919.
- [32] «Water Altitude Boiling Point Calculator,» CSG Network, [En línea]. Available: <http://www.csghnetwork.com/h2oboilcalc.html>.
- [33] Analytical Testing Solutions Ltd, «Emissivity Coefficients of some common Materials,» Analytical Testing Solutions Ltd, [En línea]. Available: <https://analytical-testing.ie/blog/emissivity-coefficients/>.
- [34] INEOS SA, «INEOS,» 2014. [En línea]. Available: <https://www.ineos.com/globalassets/ineos-group/businesses/ineos-olefins-and-polymers-usa/products/technical-information--patents/ineos-engineering-properties-of-pp.pdf>.
- [35] «Melexis Digital Infrared thermometer,» Melexis, [En línea]. Available: <https://www.melexis.com/en/product/MLX90614/Digital-Plug-Play-Infrared-Thermometer-TO-Can#>.

- [36] «Arduino Uno REV3,» Arduino, [En línea]. Available: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>.
- [37] Volcán SA, «Catálogo Técnico. Soluciones de Aislamiento Industrial,» [En línea]. Available: [http://www.volcan.cl/industrial/fichas/catalogo\\_tecnico.pdf](http://www.volcan.cl/industrial/fichas/catalogo_tecnico.pdf).
- [38] J. Harrison, «Florida Solar Energy Center,» 24 Diciembre 2001. [En línea]. Available: [http://www.fsec.ucf.edu/en/research/solarthermal/solar\\_cooker/documents/reflective-materialsreport.pdf](http://www.fsec.ucf.edu/en/research/solarthermal/solar_cooker/documents/reflective-materialsreport.pdf).
- [39] N. T. Thomopoulos, «Sample Mean and Variance,» de *Essentials of Monte Carlo Simulation*, Springer, 2013, p. 93.
- [41] J. D. J. J. Aldaz Berruezo, «Situación del Convenio Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Resumen de las Cumbres de París, COP 21 y de Marrakech, COP 22,» *Salud Ambiental*, pp. 34-39, 2017.
- [42] Fondriest, «Solar Radiation and Photosynthetically Active Radiation,» Fondriest Environmental Inc., 11 March 2014. [En línea]. Available: <http://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/weather/photosynthetically-active-radiation/#>.
- [43] M. S. Atwal, «SteemKR,» 2013. [En línea]. Available: <https://steemkr.com/steemiteducation/@mathworksheets/three-methods-for-transfer-of-heat>.

- [44] A. Harrison, «Effect Of Atmospheric Humidity On Radiative Cooling,» *Solar Energy*, vol. 26, n° 3, pp. 243-247, 1981.
  
- [45] D. D. Y.S. Touloukian, Thermophysical properties of matter Vol 7 - Thermal Radiative Properties. Metallic Elements and Alloys, Purdue Reasarch Foundation, 1970.
  
- [46] A. F. J. L. G. Mihalakakou, «The cooling potential of a metallic nocturnal radiator,» *Energy and Buildings*, vol. 28, pp. 252-256, 1998.
  
- [47] C. C. J. S. J. T. Jay Burch, «Simulation Of An Unglazed Collector System For Domestic Hot Water And Space Heating And Cooling,» *Solar Energy*, vol. 77, pp. 399-406, 2004.
  
- [48] M. .. S. D. N. A. A. Argiriou, «Assessment Of The Radiative Cooling Potential Of A Collector Using Hourly Weather Data,» *Energy*, vol. 19, n° 8, pp. 879-888, 1993.
  
- [49] I. M. S. T. I. M. I. A. Hamza H. Ali, «Cooling Of Water Flowing Through A Night Sky Radiator,» *Solar Energy*, vol. 55, n° 4, pp. 235-253, 1995.