

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

SANTIAGO-CHILE



Diseño y construcción de un sistema de refrigeración pasivo para viviendas, utilizando en radiación nocturna.

Pablo Esteban Rivera Hernández

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO
CIVIL MECÁNICO

Profesor Guía: Dr. Rodrigo Barraza

Profesor Co-referente: Dr. Jorge Contreras

Abril de 2019

Resumen

Este trabajo es una contribución a los estándares esperados por el gobierno de *Chile* dentro de las normativas energética Chile 2050, en donde a través de la utilización de un fenómeno llamado radiación nocturna, el cual consiste en disipar calor por radiación de cuerpos que se encuentran en la tierra a una temperatura mayor a un sumidero infinito de calor que es el cielo nocturno y el espacio exterior que se encuentran a menor temperatura, sobre el cero absoluto.

El objetivo principal es la creación de un sistema de climatización que pueda ocupar este potencial de enfriamiento que nos entregan los cielos nocturnos, en especial los cielos despejados y con baja humedad relativa. Para lograr enfriar los espacios y las estructuras habitables, logrando mejores estándares de confort térmico dentro de ellos. El confort térmico es la sensación que expresa la satisfacción de los usuarios de las viviendas con el ambiente. Es un valor subjetivo para cada persona y depende de su producción de calor y expectativas entre otros.

Dentro de esta memoria se podrá conocer que es la radiación nocturna, las aplicaciones ya existentes en esta temática. El diseño de una unidad de disipación de calor llamado radiador nocturno, en el cual el medio de transporte de energía es el aire y en otro caso el agua. También conocer las partes que conformar el sistema de climatización de la vivienda, las pruebas realizadas sobre ellos y los instrumentos utilizados para la medición. Los resultados de los diseños nos muestran que los equipos son capaces de disminuir la temperatura de las masas de aire que circula dentro de ellos más allá de 5 °C, lo cual según la literatura valida los radiadores nocturnos como potencial equipo de climatización pasiva. A su vez, son capaces de disipar una potencia de $50 \frac{W}{m^2}$ cuando el potencial es el máximo y 4.3 MJ de energía en un periodo de funcionamiento, lo suficiente para congelar 13 kg de hielo.

Finalmente, la presentación de conclusiones de las pruebas realizadas sobre los sistemas de climatización instalados en la casa Fénix II ubicada en el laboratorio de energías renovables de la UTFSM y una retroalimentación sobre los posibles puntos de mejora del proyecto.

Abstract

His work is a contribution to the standards expected by the government of Chile within the energy regulations Chile 2050, where through the use of a phenomenon called night radiation, which consists of dissipating heat by radiation from bodies found in the earth at a temperature greater than an infinite sink of heat that is the night sky and outer space that are at a lower temperature, above absolute zero.

The main objective is the creation of an air conditioning system that can occupy this cooling potential that the night skies give us, especially the clear skies and with low relative humidity. To achieve the cooling of habitable spaces and structures, achieving better thermal comfort standards within them. Thermal comfort is the sensation that expresses the satisfaction of the users of the homes with the environment. It is a subjective value for each person and depends on their production of heat and expectations among others.

Within this memory it will be possible to know what night radiation is, the applications already existing in this subject. The design of a heat dissipation unit called a night radiator, in which the means of energy transport is air and in another case water. Also know the parts that make up the HVAC system of the house, the tests carried out on them and the instruments used for the measurement. The results of the designs show us that the equipment is capable of lowering the temperature of the masses of air circulating inside them beyond 5°C , which according to the literature validates the night radiators as potential passive air conditioning equipment. In turn, they are able to dissipate a power of $50\text{ w} / \text{m}^2$ when the potential is the maximum and 6.4 MJ of energy in a period of operation, enough to freeze 19 kg of ice.

Finally, the presentation of conclusions of the tests carried out on the air conditioning systems installed in the house Fénix II located in the laboratory of renewable energies of the UTFSM and a feedback on the possible points of improvement of the project.

Glosario

TDC Transferencia de calor

T_{sky} Temperatura de cielo

T_{in} Temperatura de entrada de componente

T_{out} Temperatura de salida de componente

T_{rocio} Temperatura de punto de rocío

T_p Temperatura de placa

ε_{cielo} Emisividad de cielo

ε_p Emisividad de placa

HR Humedad relativa

σ constante de Stefan-boltsman

h coeficiente de transferencia de calor por convección

v Velocidad del viento

Q_{util} Calor extraído desde el aire por el radiador nocturno

Q_{real} Calor disipado hacia el ambiente por el radiador nocturno

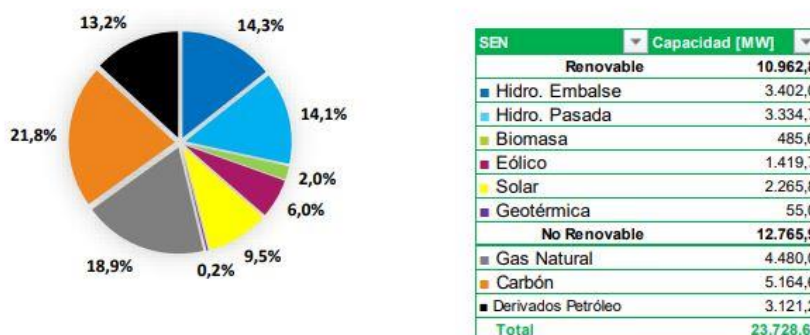
Contenido

Resumen	ii
Introducción.....	vii
Objetivos.....	ix
Objetivos generales	ix
Objetivos específicos	ix
1. Estado del arte.....	2
Radiación nocturna.....	2
Aplicaciones	2
Techos de gran masa térmica con aislamiento móvil.....	2
Techos livianos	3
Estimaciones temperatura de cielo	4
2. Desarrollo experimental	7
Cálculo de temperatura de cielo	7
Balance de energía en la superficie	9
Diseño sistema aire radiación	11
Intercambiador de calor aire-radiación	11
Muro de acumulación	15
Ventilador axial.....	16
Diseño sistema agua radiación.....	17
Radiador nocturno tipo colector sin vidrio	17
Unidad terminal sistema de agua.....	17
Bomba de circulación de agua en colector	18
Estanque de acumulación	19
3. Plan de medición	21
Sistema aire radiación	21
Sistema colector solar sin vidrio.....	22
Condiciones ambientales.....	22
4. Error de medición y propagación	25
5.1 Resultados sistema de aire-radiación	28
Radiador nocturno.....	28
Muro de acumulación.....	34
Temperatura interna de la casa	34

5.2	Resultados sistema colector solar sin vidrio	36
	Radiador nocturno.....	36
	Techo de cobre.....	37
	Estanque de acumulación	38
6	Conclusiones.....	39
7	Propuestas de mejora al sistema.....	40
	Referencias	41
	Anexo.....	42

Introducción

Las energías renovables en Chile se encuentran en auge debido al alza en la instalación de energía solar y eólica, en los últimos años la matriz energética chilena ha avanzado a un futuro con menos emisiones de carbono en la producción de eléctrica. La siguiente problemática que debemos abordar es la utilización de las energías que tenemos disponibles para el consumo tanto domiciliario como industrial.



Fuente: Coordinador Eléctrico Nacional

*Ilustración 1 el gráfico representa los porcentajes de la capacidad de generación eléctrica instalada en el país al año 2017.
Fuente coordinador eléctrico nacional.*

Abordaremos la necesidad de confort térmico dentro de la vivienda, ya que, esta debe generar espacios que ofrezcan al usuario las condiciones ambientales adecuadas para el desarrollo de sus actividades en situación de confort. Tanto la envolvente de la vivienda como los sistemas constructivos del interior que la conforman juegan un rol fundamental en conseguir estas condiciones. Para ello se debe tener en consideración, entre otros elementos, el efecto del entorno, el comportamiento de los usuarios y el modo de operación de la vivienda.

Para lograr este objetivo se utilizará el fenómeno de enfriamiento por radiación nocturna, el cual es un fenómeno natural y consiste en que todos los cuerpos, a temperatura superior a 0 K, emiten radiación electromagnética con espectros de diferentes longitudes de onda en función de su temperatura. Considerando las temperaturas ambientales comunes en la Tierra, la radiación emitida se encuentra en el rango de longitudes de onda larga (entre 5 y 100 μm). Cuando un cuerpo, un edificio o la superficie terrestre entre otros, es expuesto a un cuerpo de menor temperatura (el cielo, una masa de agua, o cualquier superficie fría), el cual se pueda considerar como un pozo térmico a temperatura constante, se produce un enfriamiento radiativo. El cuerpo más caliente experimentará un determinado enfriamiento debido a que la cantidad de calor que pierde es mayor que la que gana; el balance térmico es negativo (González, 2002). Este principio puede ser utilizado dentro de un sistema de ventilación integrado dentro de la edificación, que permita disminuir la carga térmica de las viviendas, utilizando el fenómeno de la radiación nocturna para disminuir la temperatura de la edificación. Con el fin de, provocar una disminución parcial en el consumo eléctrico en climatización y una mejora en el estándar de vida de los ocupantes.

Y así, contribuir en uno de los pilares fundamentales que propone el instructivo “energía 2050” publicado por el gobierno de Chile, para ser usado como una guía general en el desarrollo energético del país. El pilar N°2 de la política energética “Energía como motor del desarrollo”, en su lineamiento N°11 revela la

necesidad de abordar las problemáticas energéticas mencionadas estableciendo como primera acción el concepto de “pobreza energética”. Este concepto engloba los elementos que determinan la pobreza energética en Chile, indicadores y herramientas metodológicas para su medición y seguimiento (energía, 2016). Tomando en cuenta la meta número 8 del plan energético nacional “El 100% de las edificaciones nuevas cuentan con estándares OCDE de construcción eficiente, y cuentan con sistemas de control y gestión inteligente de la energía”. A través, de la construcción y diseño de un sistema pasivo de refrigeración de viviendas, aplicable a viviendas sociales, edificios y casa particulares.



Ilustración 2 principales metas del instructivo nacional de energía Chile 2050.

Objetivos

Objetivos generales

Diseño y construcción de un prototipo de radiador nocturno aire-radiación y un colector solar sin vidrio, para evaluar su potencial como método de refrigeración pasivo.

Objetivos específicos

- Analizar el estado del arte de este tipo de tecnología.
- Diseñar un prototipo de radiador nocturno tipo colector sin vidrio y aire-radiación.
- Realizar simulaciones numéricas, para estimar el potencial de enfriamiento.
- Construcción de prototipos tipo aire-radiación y colector solar sin vidrio.
- Realización de mediciones para evaluar el potencial de enfriamiento de ambos prototipo

Capítulo 1

“Estado del arte”

En el capítulo 1 se presenta el concepto de radiación nocturna, el fenómeno que la produce y las condiciones a las cuales esta tiene el mayor potencial. A la vez se presentan aplicaciones prácticas existentes, que son el guía para la construcción de los radiadores nocturnos aire-radiación y colector solar sin vidrio. Correlaciones que permiten estimar la temperatura de cielo que más adelante serán utilizadas para el cálculo del potencial de enfriamiento de los prototipos.

1. Estado del arte

Radiación nocturna

Todos los cuerpos, a temperatura superior a 0 K, emiten radiación electromagnética con espectros de diferentes longitudes de onda en función de su temperatura. Considerando las temperaturas ambientales comunes en la Tierra, la radiación emitida se encuentra en el rango de longitudes de onda larga (entre 5 y 100 μm). Cuando un cuerpo, un edificio o la superficie terrestre entre otros, es expuesto a un cuerpo de menor temperatura (el cielo, una masa de agua, o cualquier superficie fría), el cual se pueda considerar como un pozo térmico a temperatura constante, se produce un enfriamiento radiativo. El cuerpo más caliente experimentará un determinado enfriamiento debido a que la cantidad de calor que pierde es mayor que la que gana; el balance térmico es negativo (González, 2002).

El enfriamiento radiativo durante las noches tiene lugar debido a que la atmósfera terrestre presenta ciertas características que permiten este fenómeno. La atmósfera terrestre representa, para la radiación que emite la superficie, una especie de filtro: muy limpio, cuando el cielo está claro, sin nubes y con una humedad específica baja, y muy tupido, cuando el cielo está nublado y la humedad específica es elevada.

La dimensión de la “ventana atmosférica” se ve reducida por la presencia de la nubosidad. Las nubes bloquean la radiación re-emitiéndola hacia la tierra. Esto es debido a que las partículas de agua de las nubes absorben y emiten el espectro total emitido por la tierra, en contraste con la absorción selectiva del vapor de agua. Por esta razón los lugares con mayor potencial de enfriamiento corresponden a sitios de cielo claro, baja humedad específica y poco viento. Por el contrario, los lugares húmedos y nublados, y aquellos expuestos a fuertes vientos, disponen de menores posibilidades de aplicabilidad de este mecanismo de enfriamiento. Sin embargo, aun en lugares húmedos, con cielos predominantemente sin mucha nubosidad y sin viento, en horas nocturnas, puede considerarse el enfriamiento radiativo como una alternativa. Por otro lado, la aplicabilidad del enfriamiento radiativo depende no solo del potencial que ofrece el lugar, sino también del sistema a utilizar. (Givoni, 1994)

Aplicaciones

Techos de gran masa térmica con aislamiento móvil

Este sistema consiste en un techo conformado por una cantidad determinada de bolsas con agua como fluido acumulador de energía, sobre un techo metálico de láminas corrugadas. Este conjunto es cubierto durante el día con placas aislantes, con el fin de reducir la ganancia de calor por radiación solar y al mismo tiempo absorber el calor desde el interior de la estructura. Durante la noche las láminas aislantes son removidas dejando las bolsas expuestas al cielo nocturno, permitiendo que el calor acumulado por ellas sea disipado por radiación hacia el cielo nocturno. El sistema tiene la capacidad de

enfriar y calentar el ambiente interior, manteniendo las bolsas expuestas a la radiación solar durante el día y aisladas en la fría noche. El primer montaje experimental de este tipo de tecnología (Skytherm), lo construyó su propio inventor, Harold Hay, entre los años 1967 y 1968, en la ciudad de Phoenix, Arizona. Los resultados de las pruebas experimentales confirmaron que el sistema Skytherm, es capaz de mantener la temperatura interna del hogar en un rango de 20 a 27.8 °C, sin necesidad de un consumo de energía en calefacción, cuando las temperaturas externas fluctuaron en un rango entre 0 a 45 °C.

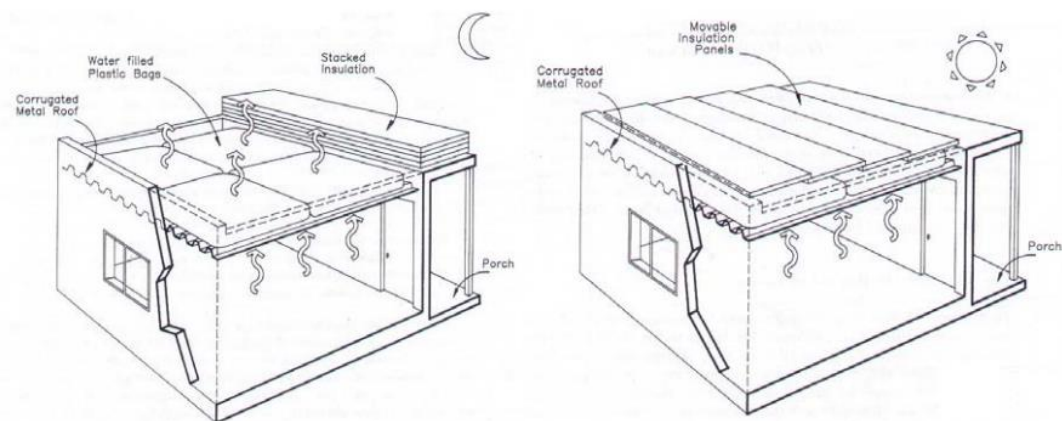


Figura 1 Funcionamiento del sistema "Skytherm" cuando se encuentra en modo de refrigeración durante el día. A la izquierda techo descubierto durante la noche, a la derecha techo cubierto durante el día. Givoni (1994)

Techos livianos

Este tipo de sistema de enfriamiento radiativo consiste en un techo metálico, con un aislamiento térmico interior. El objetivo es aprovechar el enfriamiento producido por la noche sobre la placa metálica, la cual se encuentra recubierta por una pintura de alta emisividad en el espectro infrarrojo. Al caer el atardecer la placa comienza a disminuir su temperatura rápidamente, gracias a la pérdida de calor por radiación, hasta alcanzar la temperatura ambiente. Luego comienza a perder calor por radiación de onda larga y a ganar calor por convección hasta alcanzar la temperatura de estancamiento. La temperatura de estancamiento muestra el potencial de enfriamiento radiativo de una placa tipo techo liviano en determinadas condiciones climáticas. En opinión de Givoni (1977) "para que sea de algún valor, como sistema de enfriamiento, la temperatura de estancamiento de la placa debe ser menor a la temperatura del ambiente, con una diferencia mínima de al menos 5 °C, de otro modo, puede ser utilizado el enfriamiento por ventilación nocturna que resulta más simple y económico"

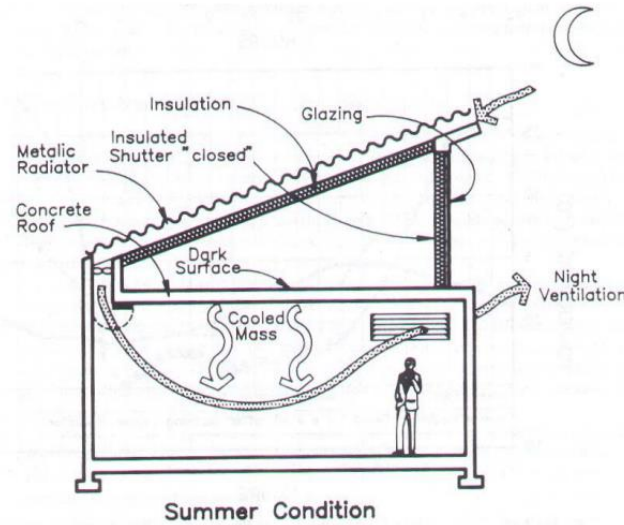


Figura 2 operación nocturna para enfriamiento de disipador de calor tipo techo, Baruch Givoni, 1977.

Estimaciones temperatura de cielo

En los procesos de enfriamiento a cielo es importante conocer la radiación infrarroja que emite la atmósfera hacia abajo conocida como radiación nocturna. Esta radiación es muy importante en climas cálidos y húmedos, evitando que los cuerpos expuestos bajen su temperatura radiativamente. Por otra parte, en climas secos y poco nubosos, esta radiación es baja permitiendo a los cuerpos radiar más de lo que reciben, enfriándose. La radiación nocturna se puede caracterizar de dos formas: por medio de una temperatura de cielo T_c o por medio de una emisividad efectiva ε de atmósfera. Estas variables quedan definidas a través de las siguientes relaciones

$$\text{Radiación total recibida} = \sigma T_c^4 = \varepsilon \sigma T_a^4 \quad [1]$$

En la ciudad de Cachi se realizaron campañas de medición para poder estimar correlaciones que permitan estimar la emisividad de cielo y la temperatura de cielo, en función de parámetros como la temperatura de punto de rocío, la altura geográfica y la temperatura ambiente. En primera instancia se presentan correlaciones obtenidas en campañas de medición anteriores para la ciudad de Salta, en donde la temperatura de rocío se expresa en grados Celsius.

$$\varepsilon = 0,772 + 0,41 * \frac{t_R}{100} + 0,51 * \left(\frac{t_R}{100} \right)^2 \quad [2]$$

Esta correlación tuvo una dispersión de un 4% dentro de las medidas mensuales de la campaña, por ello, permitió realizar un estudio estadístico con datos del Servicio Meteorológico Nacional de Argentina (Frigerio, 2001). De estudios anteriores de emisividad en otras zonas geográficas, se sugiere usar la siguiente ecuación 3, que tiene en cuenta la altura geográfica. La constante $\varepsilon(0, z)$ es diferente para

cada altura geográfica. Sin embargo, como se menciona en los trabajos aún falta realizar mayores mediciones y ver como se modifica la *ecuación 3*.

$$\varepsilon = \varepsilon(0, z) + 0,772 + 0,41 * \frac{t_R}{100} + 0,51 * \left(\frac{t_R}{100} \right)^2 \quad [3]$$

Otra forma de caracterizar la radiación nocturna es por medio de la temperatura de cielo T_c , dada por la *ecuación 4*. En lugar de buscar una correspondencia de ésta con variables meteorológicas, se buscó una relación para la depresión nocturna definida por la diferencia entre temperatura ambiente T_a y temperatura de cielo. También se creó una relación de esta cantidad con la temperatura de rocío T_r al igual que se hizo con la emisividad. En el *gráfico 1*, se muestran las temperaturas ambiente y de cielo, datos nocturnos promedio para Cachi correspondientes a todos los años mencionados, en función de T_r .

$$\Delta T = T_a - T_c \quad [4]$$

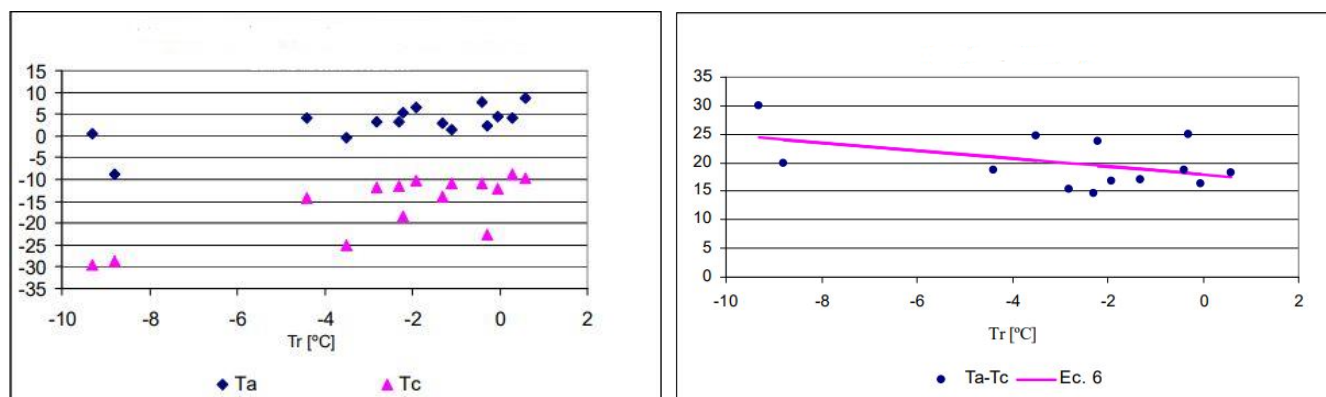


Gráfico 1 temperatura ambiente y temperatura de cielo promedio obtenidas en función de temperatura de rocío, para campañas de medición realizadas en la ciudad de Cachi. (J.P Busano, 2006)

La expresión que mejor se ajustó al *grafico 1* fue la *ecuación 5* con un $r^2 = 0,22$, dado que la desviación promedio de datos es del orden 20%. Sólo un mayor número de medidas podría mejorar este resultado, lo que justificaría seguir con campañas de mediciones.

$$\Delta T = -0,69 * T_r + 18,0 \quad [5]$$

Capítulo 2

“Desarrollo experimental “

En el capítulo 2 se presenta para el lector los cálculos utilizados para los distintos factores que influyen en la disipación de calor del sistema, como la temperatura de cielo y el balance de energía sobre la placa intercambiadora de calor. A su vez, los cálculos y simulaciones realizados para el diseño del sistema aire radiación y sus partes. También se presentan las partes del sistema agua radiación. De aquí se puede extraer el dimensionamiento de los equipos a utilizar más adelante en la experimentación.

2. Desarrollo experimental

Cálculo de temperatura de cielo

La temperatura de cielo es una relación entre la temperatura del espacio exterior 3 K y la temperatura de la atmosfera terrestre. Los principales gases que influyen en esta temperatura son gases como CO_2 y vapor de agua, los cuales absorben en parte la radiación incidente desde el espacio y también la radiación que sale desde la tierra, esto provoca una influencia directa en la temperatura de cielo. La cual es la temperatura del sumidero de radiación de la tierra. Para estimar esta temperatura de cielo existen ecuaciones experimentales en las cuales, las principales variables son la humedad relativa y la temperatura ambiente:

Método de Berdhal and Fromberg (1982)

$$T_{Rocío} = T_{ext} + 35 \ln\left(\frac{HR}{100}\right) \quad [6]$$

$$\varepsilon_{cielo} = 0.741 + 0.0062 * T_{rocío} \quad [7]$$

Para el cálculo de la temperatura de cielo se utilizó la *ecuación 8* creada a partir de mediciones en la ciudad de Cachi, ubicado al noreste de Argentina (J.P Busano, 2006). En donde se entrelazaron mediciones de 4 campañas distintas de medición y se llegó a la siguiente correlación, la cual tiene un 20 % de dispersión de datos. A continuación, se presentan las condiciones ambientales con las cuales se realizó la simulación de la temperatura de cielo.

$$T_{cielo} = T_{ext} + 0.69 * (T_{rocío} - 273) - 18 [^{\circ}C] \quad [8]$$

Temperatura ambiente y Humedad relativa

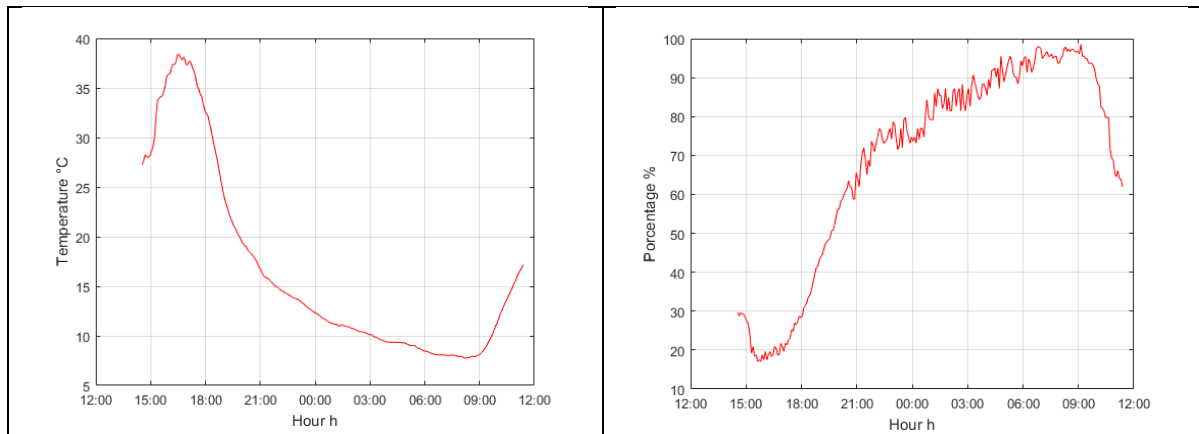


Gráfico 2 condiciones ambientales utilizadas para calcular la temperatura de cielo. A la derecha humedad relativa y a la izquierda temperatura ambiente, para un periodo desde el de día 21/4 al mediodía hasta el 22/4.

Temperatura de cielo

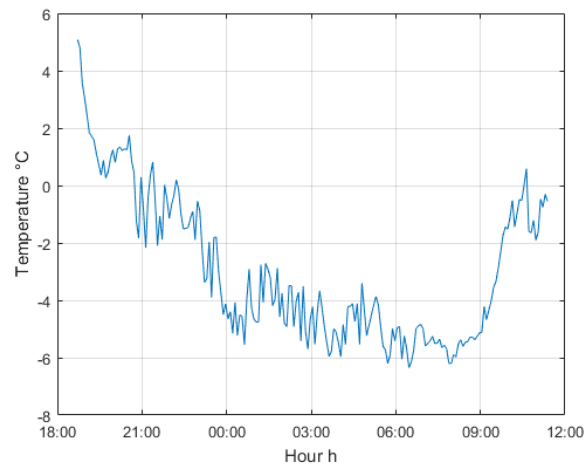


Gráfico 3 temperatura de cielo calculada con la ecuación 3, para un periodo desde el de día 21/4 al mediodía hasta el 22/4.

Balance de energía en la superficie

La radiación emitida por un cuerpo negro se define como la razón entre la constante de Stefan-Boltzman, la emisividad de la placa y la temperatura del cuerpo. La superficie a realizar el balance de energía corresponde a la placa de aluminio pintada de negro que se puede ver en la *figura 3*.

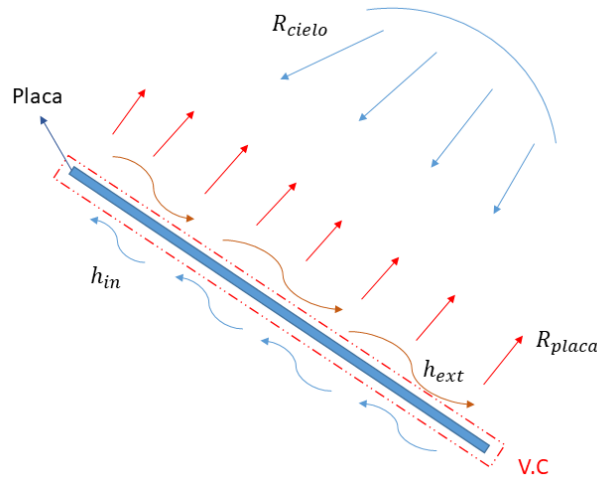


Figura 3 esquema del volumen de control utilizado en el balance de energía de la placa plana instalada en el colector solar aire radiación. En donde R_{cielo} y R_{placa} representan la radiación que emite el cielo y la placa, h_{ext} y h_{in} representan la convección externa e interna sobre la placa.

Para comenzar el análisis del balance de energía se debe conocer la radiación que sale de la placa *ecuación 9* y la radiación del cielo incidente en la placa *ecuación 10*. En donde ε_{cielo} es la emisividad de cielo, T_{cielo} es la temperatura de cielo y ε_p es emisividad de la placa igual a 0.8. Ambos valores son calculados en función de las condiciones ambientales presentadas anteriormente.

$$R_p = \sigma * T_p^4 * \varepsilon_p \quad [9]$$

$$R_c = \sigma * T_{cielo}^4 * \varepsilon_{cielo} \quad [10]$$

No obstante, las superficies que experimentan enfriamiento radiativo nocturno tiene temperaturas por debajo de la temperatura ambiente. Por esta razón, no es despreciable el efecto de la convección sobre estas. Para calcular el efecto convectivo se utiliza la *ecuación 11* llamada “ecuación de Duffie & Beckamn”. Donde h es el coeficiente de transferencia de calor por convección, v es la velocidad del viento y T_{ext} es la temperatura ambiente.

$$h = 5.7 + 3.8v \quad [11]$$

$$Q_c = h (T_p - T_{ext}) \quad [12]$$

Finalmente, con todos los flujos de calor ya calculados se procede a realizar un balance de energía sobre la superficie disipadora de calor *ecuación 13*, y así conocer el potencial de enfriamiento. Donde R_p radiación que emite de la placa, R_c radiación que emite el cielo y Q_c pérdida de calor por convección (M. Victoria Mercado, 2013).

$$Q_{pot} = R_p - R_c - Q_c \quad [13]$$

Para poder utilizar el modelo anterior se debe conocer la temperatura de placa T_p , el cual fue medido en una placa plana de aluminio aislada que se encontró expuesta hacia el cielo nocturno, con una orientación de 30 grados hacia el sur en la comuna de Puente Alto.



Figura 4 Placa plana utilizada para obtener la temperatura de placa y realizar el cálculo de potencia de enfriamiento (Barrios, 2018).

A continuación, se presenta la temperatura de placa y el resultado de la potencia de enfriamiento.

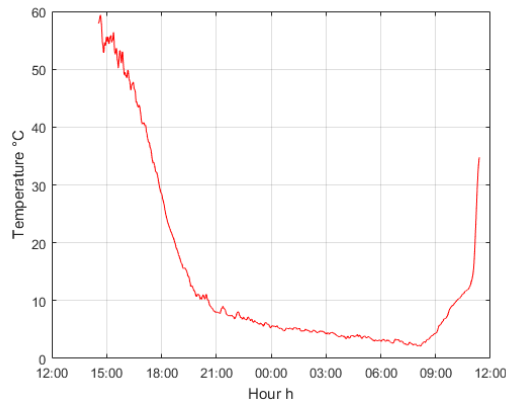


Gráfico 4 temperatura de placa medida en la placa plana experimental, para un periodo desde el de día 21/4 al mediodía hasta el 22/4.

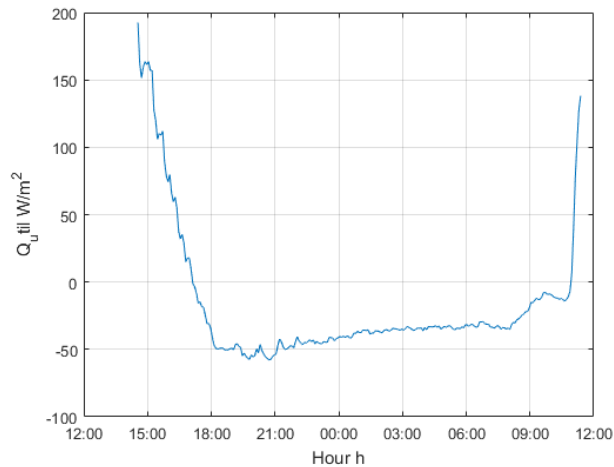


Gráfico 5 Potencia de enfriamiento calculada con las relaciones presentadas anteriormente.

Diseño sistema aire radiación

Radiador nocturno aire-radiación

El diseño del intercambiador de calor consiste en una estructura vacía en su interior para permitir el flujo de aire desde la entrada hacia la salida del colector, una estructura aislada en las caras inferiores, laterales y en la parte superior una lámina de aluminio pintada de negro que permite el intercambio radiativo hacia el cielo nocturno. Para poder crear un diseño conceptual del radiador nocturno, se realizó un modelo numérico de transferencia de calor en el software Matlab con el fin de obtener una aproximación del funcionamiento del radiador nocturno. Este modelo está compuesto de las siguientes ecuaciones y relaciones numéricas.

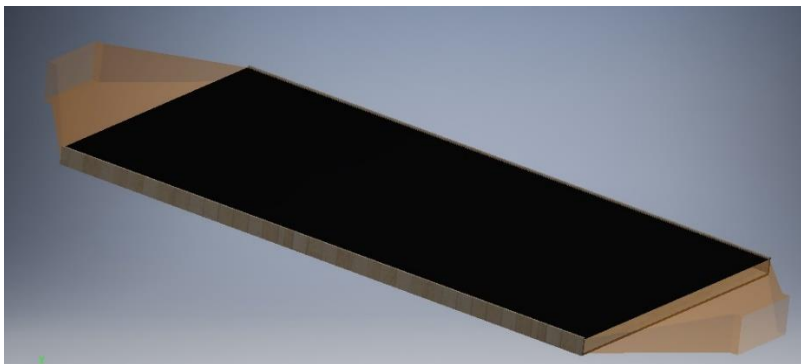


Figura 5 Diseño en software inventor de intercambiador de calor aire-radiación.

Número de Reynolds nos entrega el tipo de flujo que circula dentro de la sección rectangular, laminar o turbulento. En donde ρ es la densidad del fluido, L_c es el largo del colector y μ es la viscosidad dinámica.

$$Re = \frac{\rho V_{prom} L_c}{\mu} \quad [14]$$

El número de Prandtl es un número adimensional proporcional al cociente entre la velocidad de difusión de la cantidad de momento(viscosidad) y la difusividad térmica. En donde C_p es la capacidad calorífica del aire a presión constante y k es la conductividad térmica del aire.

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad [15]$$

Para régimen de flujo turbulento completamente desarrollado ($D_h \geq 30$) para la condición en la cual un lado es calentado y el otro permanece aislado, se tiene la siguiente correlación (W.Keys, 1966). Con estos datos se calcula el coeficiente de transferencia de calor por convección para el sistema.

$$Nu = 0.0158 Re^{0.8} \quad [16]$$

$$h = Nu \frac{k}{L_c} \quad [17]$$

Obteniendo estos coeficientes y junto al cálculo estimado de la potencia de enfriamiento del sistema en el *gráfico 5*, se puede obtener una aproximación de la temperatura de salida del radiador nocturno aire-radiación utilizando la *ecuación 18*.

$$T_{out} = \frac{Q_{pot}}{h} + T_{in} \quad [18]$$

Para realizar el dimensionamiento de la unidad se realizó una comparación entre la capacidad de enfriamiento del colector a una temperatura de entrada de 25 °C y potencia de enfriamiento de 40 $\frac{W}{m^2}$, en función del largo del colector. Para comparar la diferencia de la temperatura de salida del aire a distintos caudales.

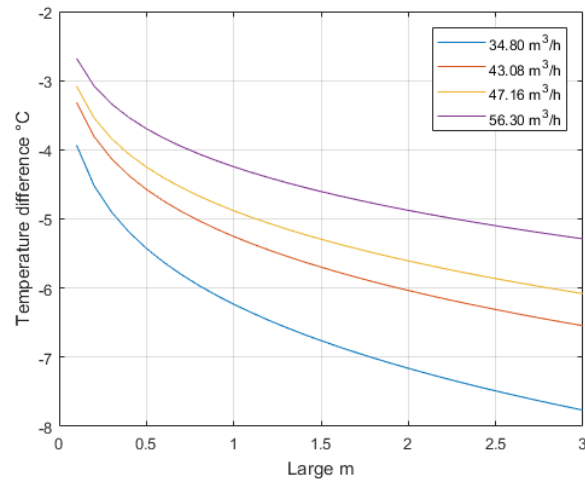


Gráfico 6 representación de la diferencia de temperatura de salida menos la temperatura de entrada, en función del largo del colector aire radiación, cuando el ancho es de 1 m.

En el gráfico 6, se puede apreciar que la pendiente de la función es mayor en los primeros centímetros del colector y es donde ocurre la mayor TDC. Luego la pendiente comienza a decrecer a medida que el largo crece, prediciendo que tendrá un comportamiento asintótico. Por esta razón, en el diseño se decide utilizar un largo de dos metros, el cual se asemeja a colectores solares comerciales y permite una manipulación más fácil como unidad.

En el gráfico 7 se pueden ver resultados de dos simulaciones del sistema de enfriamiento, en donde el sistema es capaz de disipar calor hacia el cielo nocturno, ya que, la temperatura de salida es inferior a la temperatura de entrada del aire. En el gráfico 8 se presenta la comparación de las simulaciones realizadas, estas utilizan la misma potencia de enfriamiento y se realizan variaciones de caudal.

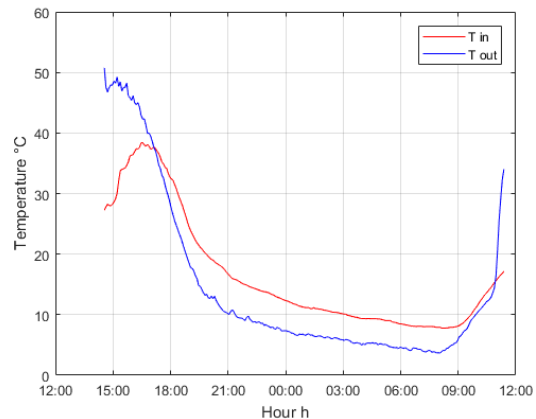
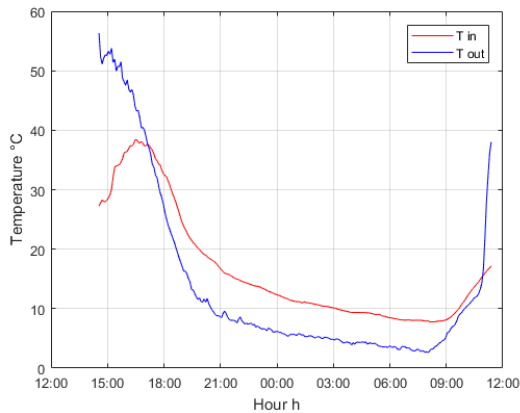


Gráfico 7 temperatura de entrada y salida del aire desde el radiador nocturno aire-radiación, para un flujo másico de 43.08 y 56.3 m³/h.

Comparación de simulaciones

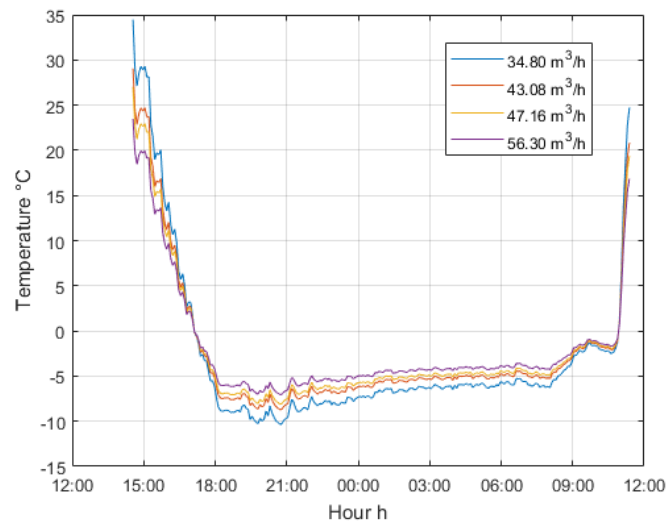


Gráfico 8 diferencia de temperatura entre salida menos entrada, para diferentes caudales simulados.

Las simulaciones muestran que el sistema podría ser capaz de enfriar aire entre 3 a 10 °C en comparación al aire que ingresa al colector solar tipo techo liviano. Lo cual nos motiva a continuar con la construcción del prototipo.



Figura 6 etapa de construcción de radiador nocturno aire radiación en LER.

Muro de acumulación

El muro de acumulación es el elemento encargado de generar inercia térmica en el espacio a climatizar. De esta manera, durante el periodo de funcionamiento del sistema de aire-radiación correspondiente a las horas de la noche circula aire por canales interiores del muro fabricados en PVC y con infiltraciones que permitieron que el aire pudiera salir desde el núcleo del muro hacia el exterior, para así, perder calor. Al comenzar la jornada diurna el sistema de aire finaliza su funcionamiento y el muro se encuentra a una temperatura más baja que el ambiente que lo rodea. Este efecto ayuda a absorber calor desde el ambiente contribuyendo a mantener una menor temperatura interna de la casa.



Figura 7 Muro de acumulación de grava construido e instalado en casa Fénix II.

Las dimensiones de muro son 1 m de ancho, 1 m de alto y una profundidad de 30 cm, tiene una masa de 542 kg, los materiales son grava con una capacidad calórica de $0.91 \frac{kJ}{kgK}$ y la estructura está fabricada en ángulo de acero al carbono con reja galvanizada.

Considerando que el aire que ingresa al muro se calienta entre 3 a 8 °C haciendo la suposición de que gana la misma cantidad de calor que fue capaz de disipar a través del radiador nocturno. Se pudo realizar una estimación de variación de temperatura del muro, considerando 12 h de operación (H_{op}), un caudal de $43.08 \frac{m^3}{h}$ y la capacidad calórica del aire a 10 °C como $1.006 \frac{kJ}{kgK}$. Utilizando la ecuación 19 se obtiene la cantidad de calor que puede disipar el aire y con la ecuación 20 podemos despejar la variación de temperatura del muro cuando la diferencia de temperatura del aire es 6 °C.

$$\dot{Q}_{aire} = \dot{m}_{aire} c_p \Delta T \quad [19]$$

$$Q_{muro} = \dot{Q}_{aire} H_{op} = M_{muro} C_{muro} \Delta T_{muro} \quad [20]$$

$$\Delta T_{muro} = 7.6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Ventilador axial

Para el sistema de aire radiación se instaló un ventilador del tipo axial marca S&P modelo TD-250/100(anexo1), el cual tiene dos velocidades y tiene un caudal máximo de operación de $180 \frac{m^3}{h}$. El caudal de operación del sistema es controlado con una válvula de mariposa para permitir configurar los distintos caudales de operación requeridos. La elección del ventilador axial se debe al bajo ruido que produce la unidad y la facilidad de instalación en ductos de PVC. A continuación, se presentan las curvas del ventilador y entre las líneas rojas están los rangos de operación en que se utilizara en la experimentación.

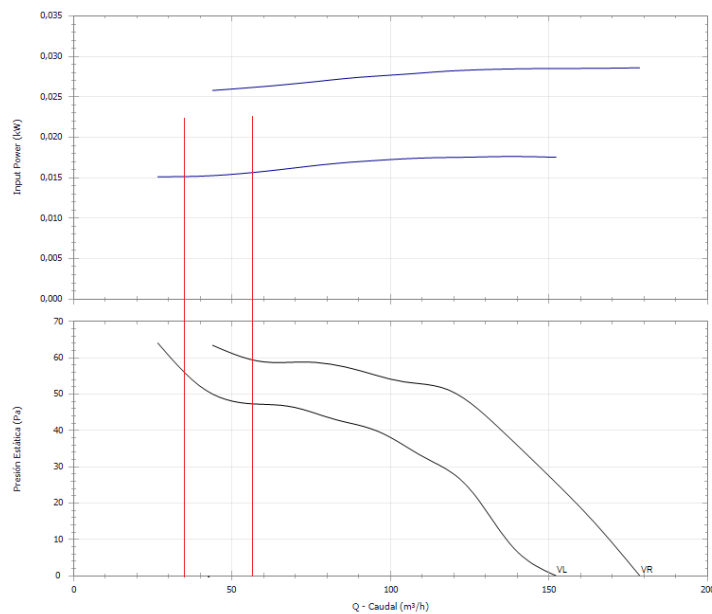


Figura 8 curvas del ventilador axial propuesto para el usos. Entre las líneas se encuentra el rango de operación del sistema. (cosmoplas, 2017).

Cabe destacar que el sistema de ventilación aire radiación solamente consume electricidad a través de este componente por ello, es importante minimizar las pérdidas de carga dentro del sistema utilizando tuberías de PVC de 110 mm y configurando la velocidad del ventilador en baja si es posible. Evitando que el caudal entre en las zonas de inestabilidad como se puede apreciar en las curvas del ventilador *figura 8*, esta zona se encuentra bajo los $30 \frac{m^3}{h}$, por ende, se descartara en la operación final del sistema caudales cercanos a este valor primando el buen funcionamiento del sistema.

Diseño sistema agua radiación

Radiador nocturno tipo colector sin vidrio

Para fabricar el radiador nocturno tipo colector solar sin vidrio o agua radiación, se desarmo un colector solar comercial fabricado previamente para el calentamiento de agua. La principal modificación realizada fue la extracción del vidrio que se encuentra entre el ambiente y los tubos del colector, con el fin de eliminar el efecto invernadero que provoca este elemento. También se mejoró la aislación de los laterales y el fondo del colector para disminuir las ganancias térmicas.

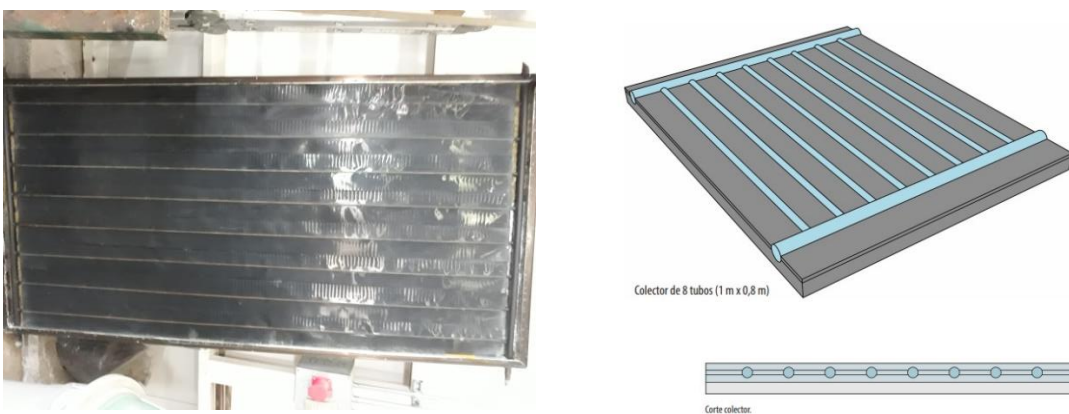


Figura 9 radiador nocturno tipo colector solar sin vidrio, a la izquierda el colector modificado y a la derecha el diseño conceptual del mismo.

Las dimensiones del colector son 2 m de largo y 1 m de ancho, consta de 7 tubos de cobre de 1/8 de pulgada y aletas de cobre que ayudan a tener una mayor área de disipación de calor. Las tuberías de entrada y salida del colector están fabricadas de tubería de 3/4 de pulgada. Debido a que, el colector solamente tiene circulación de agua en las horas nocturnas y al acumular radiación solar diurna aumenta la presión interna, se instaló un tanque de expansión para disminuir el aumento de presión interno del colector solar sin vidrio.

Unidad terminal sistema de agua

La unidad terminal del sistema de agua consiste en un intercambiador de calor entre el agua enfriada que está en el estanque de acumulación y el ambiente interior de la casa. Durante la noche el agua del circuito circula por el radiador nocturno tipo colector solar sin vidrio, enfriando la masa de agua del estanque, para posteriormente a las 8 am esta masa comience a circular por la unidad terminal de cobre para intercambiar calor con el ambiente de la casa,



Figura 10 unidad terminal de cobre instalada en techo de casa fénix II, intercambia calor entre el agua enfriada y el ambiente de la casa.

Las dimensiones de esta unidad son 1 m de largo, 0.5 m de ancho, la construcción es en cobre metal de alta conductividad térmica, las uniones se encuentran soldadas con plata y su fabricación es similar a un colector solar. La unidad terminal consta de 10 tuberías de $\frac{1}{2}$ pulgada de 1 m de largo y dos manifold de $\frac{3}{4}$ pulgadas en donde se encuentran las entradas salidas de agua y los sensores de vaina para realizar las pruebas correspondientes.

Bomba de circulación de agua en colector

El sistema de agua radiación consta de dos bombas las cuales hacen circular el fluido dentro del colector solar sin vidrio y también dentro de la unidad terminal del sistema. Como estas bombas están instaladas en sistemas cerrados, la potencia de la bomba debe ser mayor a las pérdidas de carga del sistema para funcionar de manera óptima. Por ello, se calculó la pérdida de carga dentro del radiador nocturno agua radiación *gráfico 9* para aproximar la elección de la bomba.

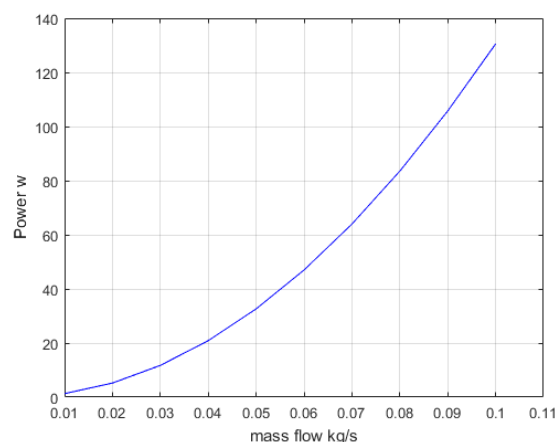


Gráfico 9 cálculo de pérdida de carga dentro del colector solar sin vidrio, en función del flujo másico.

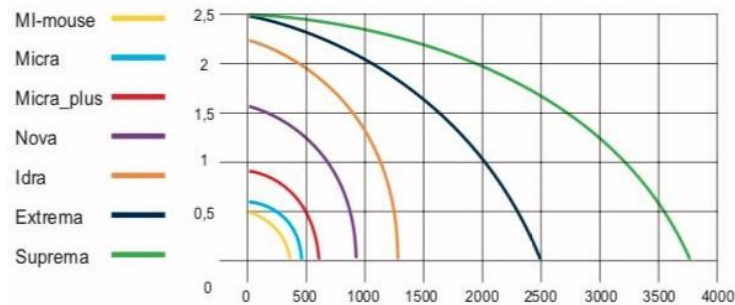


Figura 11 curva de operación bombas de circulación instaladas en el circuito agua-radiación .

La bomba elegida fue de marca Idra con una altura de 2.2 m y un caudal de 1300 l/h como se puede apreciar en la *figura 11*, la potencia máxima que consume esta bomba es de 25 w. La regulación de caudal de la bomba se realizó con una estrangulación de caudal realizada a la salida de la bomba con una válvula de bola. Los caudales utilizados son consecuentes con las alturas que debe desempeñar este elemento. Por ende, el funcionamiento de esta bomba se controla con temporizado según los requerimientos de la casa (anexo 2).

Estanque de acumulación

El estanque de acumulación es un elemento en el cual el circuito cerrado acumula el agua enfriada durante el periodo nocturno. Este estanque cuenta con una capacidad de 50 litros y 4 conexiones que corresponden a entrada y salida del radiador nocturno, entrada y salida de la unidad terminal. En primera instancia es un estanque de PVC que no se encontró aislado al ambiente y se instaló en el entretecho de la casa Fénix II, por ello, no recibió radiación directa en su funcionamiento. El tema de la aislación de este equipo queda propuesta en este trabajo para futuras mejoras al sistema. El circuito de agua es cerrado y compartido entre el colector solar sin vidrio que funciona de noche disipando el calor del agua y la unidad terminal que durante las horas del día circula agua para absorber el calor del ambiente.



Figura 12 estanque de acumulación de 50 lt instalado en casa Fénix II.

Capítulo 3

“Plan de medición”

En el capítulo 3 se presentan esquemas de los sistemas de refrigeración pasiva aire-radiación y agua-radiación, ilustrando sus partes y componentes, la ubicación de los sensores dentro de ellos, los modos de operación a los cuales fue sometido el sistema y las fechas de las campañas de medición realizadas.

3. Plan de medición

Sistema aire radiación

El sistema aire radiación consta de 2 elementos esenciales: radiador nocturno aire-radiación y muro de acumulación, en ambos se encuentran instalados sensores de temperatura en la entra y salida del flujo másico y sensores temperatura de contacto en las superficies, el piping del sistema cuenta con un anemómetro de hilo caliente que mide de manera discreta.

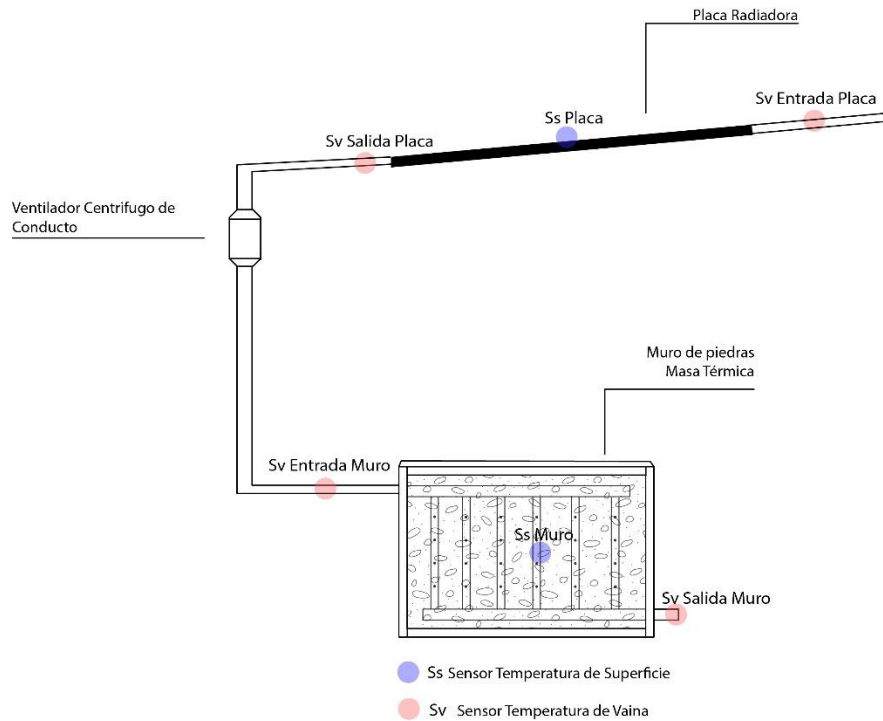


Ilustración 3: Esquema de ubicación de sensores dentro del sistema aire radiación.

Los sensores de vaina utilizados en el sistema corresponden a PT100. La PT100 es un sensor de temperatura particular de RTD (dispositivo termo-resistivo). Consiste en un alambre de platino que a 0°C tiene 100 Ω y que al aumentar la temperatura aumenta su resistencia eléctrica. El incremento de la resistencia no es lineal, pero si creciente y característico del platino.

El sistema en conjunto tiene un régimen de funcionamiento nocturno, es decir el ventilador del sistema comienza su funcionamiento a las 19 *hr* hasta las 8 *hr* del día siguiente. Mientras que el muro de acumulación es monitoreado las 24 *hr* del día para conocer la fluctuación térmica de él. Con los datos entregados por el sistema de sensores se pueden realizar balances de energía en el radiador nocturno y muro de acumulación, los cuales serán analizados en los capítulos siguientes.

La campaña de medición del sistema aire-radiación que empezó el día 25 de noviembre, realizando variaciones semanales en el flujo másico del sistema y utilizando los mejores datos para evaluar el potencial de enfriamiento del caudal estudiado. El fin de realizar las variaciones es conocer el

comportamiento de este tipo de radiador nocturno y encontrar los mejores parámetros de operación para el uso en una vivienda.

Sistema colector solar sin vidrio

El sistema de enfriamiento agua-radiación consta de 3 elementos esenciales: radiador nocturno tipo colector solar sin vidrio, un estanque de acumulación y un radiador al interior de la casa llamado unidad terminal. En ambos se encuentran instalados sensores de temperatura en la entra y salida del flujo másico y en la superficie, mientras que en el acumulador se monitorea la temperatura en el punto superior e inferior.

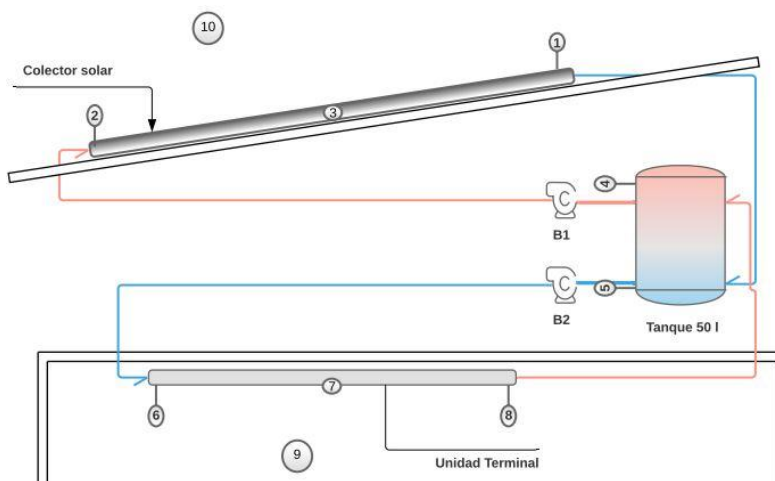


Ilustración 4: Esquema de ubicación de sensores dentro del sistema agua radiación. 1.salida radiador nocturno, 2. entrada radiador nocturno, 3. radiador nocturno, 4. entradas agua caliente, 5. salidas agua enfriada, 6. entrada agua fría, 7. unidad terminal, 8. salida agua caliente. Sensores 3 y 7 corresponden a contacto.

La campaña de medición empezó el día 14 de diciembre y se realizaron variaciones de flujo másico dentro del sistema, para evaluar el potencial de enfriamiento óptimo del sistema y encontrar los mejores parámetros de operación para la posterior instalación en una vivienda.

Condiciones ambientales

Para conocer el potencial de enfriamiento de ambos sistemas es necesario conocer las condiciones ambientales del lugar de instalación. Ya que estos datos nos permiten estimar la temperatura de cielo. En este caso es el laboratorio de energías renovables de la UTFSM, ubicado en la zona de Quilpué (-33.036573, -71.486825). La medición de estas condiciones se realizó utilizando una estación meteorológica marca HOBO, que mide datos de temperatura ambiente, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento entre otros. Los datos son recopilados de manera continua y guardados en una nube online en donde se pueden extraer para ser procesados. Este equipo comenzó la campaña de medición en el mes de noviembre y se mantuvo operativo hasta el mes de febrero en donde se dio por finalizada la primera campaña.

La medición interna de temperatura de la casa se realizó con tres sensores de temperatura ubicados en el centro de la casa y en la parte superior e inferior del muro norte de la casa. La idea de la

instalación de este grupo de medición es conocer el comportamiento de la temperatura interna de la casa antes de la instalación del sistema de enfriamiento nocturno, y luego realizar una campaña similar con el sistema ya instalado.

Capítulo 4

“Error y propagación de error”

En el capítulo 4 se conocerá el tipo de error asociado a las mediciones experimentales tales como el error por resolución y el error de precisión de los instrumentos, los cuales forman el error absoluto de los datos obtenidos. Se nombrarán los instrumentos de medición utilizados con su precisión y resolución, marca y modelo. También las formulas con las cuales se calcula la propagación del error en los cálculos.

4. Error de medición y propagación

El error de medición se asocia a la incertidumbre propia de cada instrumento, así como la capacidad de resolución que posee para generar registros de mediciones (Rouaud, 2013). Su valor equivale a una desviación absoluta respecto al valor medido. Mediante la siguiente ecuación podemos cuantificar el error perteneciente a cada uno de los instrumentos utilizados en el experimento.

$$\sigma_j = \sqrt{(\sigma_{\text{resolución}})^2 + (\sigma_{\text{incertidumbre}})^2}$$

En donde los factores son, σ_j error de medición de instrumento “j”, $\sigma_{\text{precisión}}$ error de medición asociado a precisión de instrumento y $\sigma_{\text{incertidumbre}}$ error de medición asociado a incertidumbre de instrumento. En la siguiente tabla se expondrán los instrumentos utilizados en la toma de muestras del experimento

Instrumento	Marca	Rango	Resolución	Incertidumbre
Sensor temperatura de superficie	Tinytag	[-40 - 125] °C	0.0001	±0.2
Sensor temperatura de vaina.	Tinytag	[-40 - 85] °C	0.0001	±1.0
Sensor humedad relativa	Tinytag	[0 - 100] %	0.001	±1.0
Anemómetro de hilo caliente	PCE-009-ICA	[0.2 - 20] $\frac{m}{s}$	0.1	±0.2
Estación meteorológica	Hobbo	[0 - 70] $\frac{m}{s}$	0.1	±1.0

Tabla 1 Instrumentos utilizados en la experimentación y sus características para el análisis del error instrumenta

Instrumento	Desarrollo	Error absoluto
Data logger T superficie	$\sqrt{\left(\frac{0.0001}{2}\right)^2 + 0.2^2}$	0.2 [°C]
Data logger T aire	$\sqrt{\left(\frac{0.0001}{2}\right)^2 + 1.0^2}$	1.0 [°C]
Data logger HR	$\sqrt{\left(\frac{0.001}{2}\right)^2 + 1.0^2}$	1.0 [%]
Anemómetro de hilo caliente	$\sqrt{\left(\frac{0.1}{2}\right)^2 + 0.2^2}$	0.2 [m/s]
Estación meteorológica	$\sqrt{\left(\frac{0.1}{2}\right)^2 + 1.0^2}$	1.0 [m/s]

Tabla 2 instrumentos utilizados en la experimentación y la propagación de error.

Ya analizado lo correspondiente al error de instrumentación y de medición de los instrumentos utilizados, se debe abordar la propagación de error en la realización de los cálculos en los cuales se utilizan los datos anteriores. Como cada medición directa tiene asociado un error experimental, cualquier medición indirecta obtenida a partir de ellas también tiene asociada un error experimental. Tal error se denomina error de propagación, y se estima a partir de los errores de las mediciones directas involucradas. La propagación del error es el conjunto de reglas que permiten asignar un valor de error a la medición indirecta, a partir de las mediciones directas. y dándole a cada una la importancia relativa correspondiente.

Suma y resta

$$Q = A + B - C \quad [21]$$

$$\Delta Q^2 = \Delta A^2 + \Delta B^2 - \Delta C^2 \quad [22]$$

Multiplicación, división y potencias.

$$Q = \frac{A^m B^n}{C^p} \quad [23]$$

$$\left(\frac{\Delta Q}{Q}\right)^2 = \left(m \frac{\Delta A}{A}\right)^2 + \left(n \frac{\Delta B}{B}\right)^2 + \left(p \frac{\Delta C}{C}\right)^2 \quad [24]$$

Capítulo 5

“Resultados “

En el capítulo 5 se presentan los resultados de las campañas de medición realizadas sobre los equipos de climatización pasiva. Tales como, comportamiento de cada uno de los componentes de los sistemas, temperaturas de operación, determinación de caudales de operación, influencia sobre la temperatura interna de la casa y cantidad de energía disipada.

5.1 Resultados sistema de aire-radiación

Este sistema consta de tres elementos radiador nocturno, ventilador y muro de acumulación. Los cuales se encargan de la disipación de calor por radiación entre el aire que ingresa al sistema y el cielo nocturno, movimiento del fluido de transporte de energía y acumulación de frío para mantener la inercia térmica del sistema respectivamente.

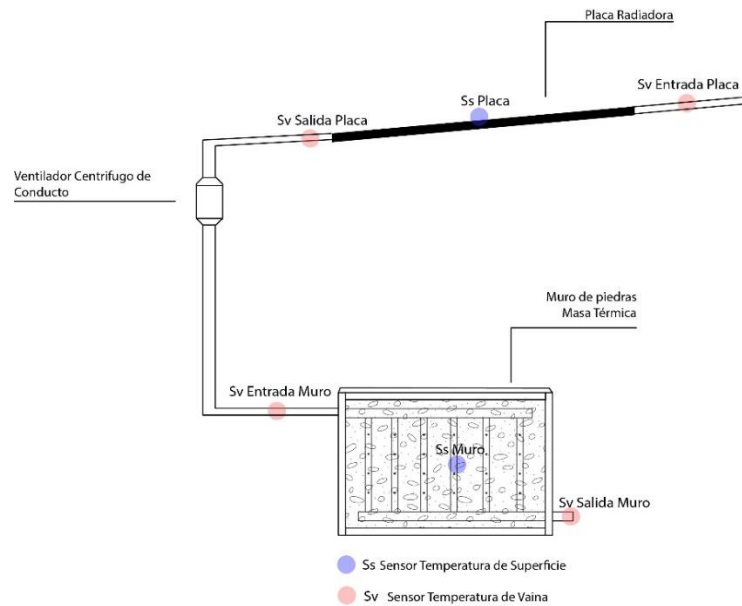


Figura 13 Representación gráfica sistema aire radiación instalado, los puntos rojos representan sensores termocuplas PT100 y los puntos azules sensores de temperatura de contacto.

Radiador nocturno aire radiación

Se diseñó un intercambiador de calor aire-radiación que consiste en una cavidad que cuenta con 3 paredes aisladas (inferior y laterales) y una placa de aluminio de 2 m^2 en la parte superior, la cual se pone en contacto con aire que pasa dentro del radiador nocturno. Los materiales aislantes utilizados en la construcción son lana de vidrio mineral de 40 mm para todas las caras.

Para comenzar las pruebas de este colector se instalan medidores de temperatura de vaina PT100 en la entrada y salida del colector y sensores de temperatura de contacto en la superficie del colector como se puede ver en la *ilustración 1*, estos datos son utilizados para calcular balances energéticos en el radiador nocturno y también para conocer el funcionamiento de él en distintas condiciones de funcionamiento. La prueba que se realizó en la ciudad de Quilpué ubicada en la 5ta región, consiste en variar el flujo másico dentro del radiador nocturno y conocer las temperaturas a las cuales se encuentra el equipo, evaluando la transferencia de calor hacia el aire de salida del colector.

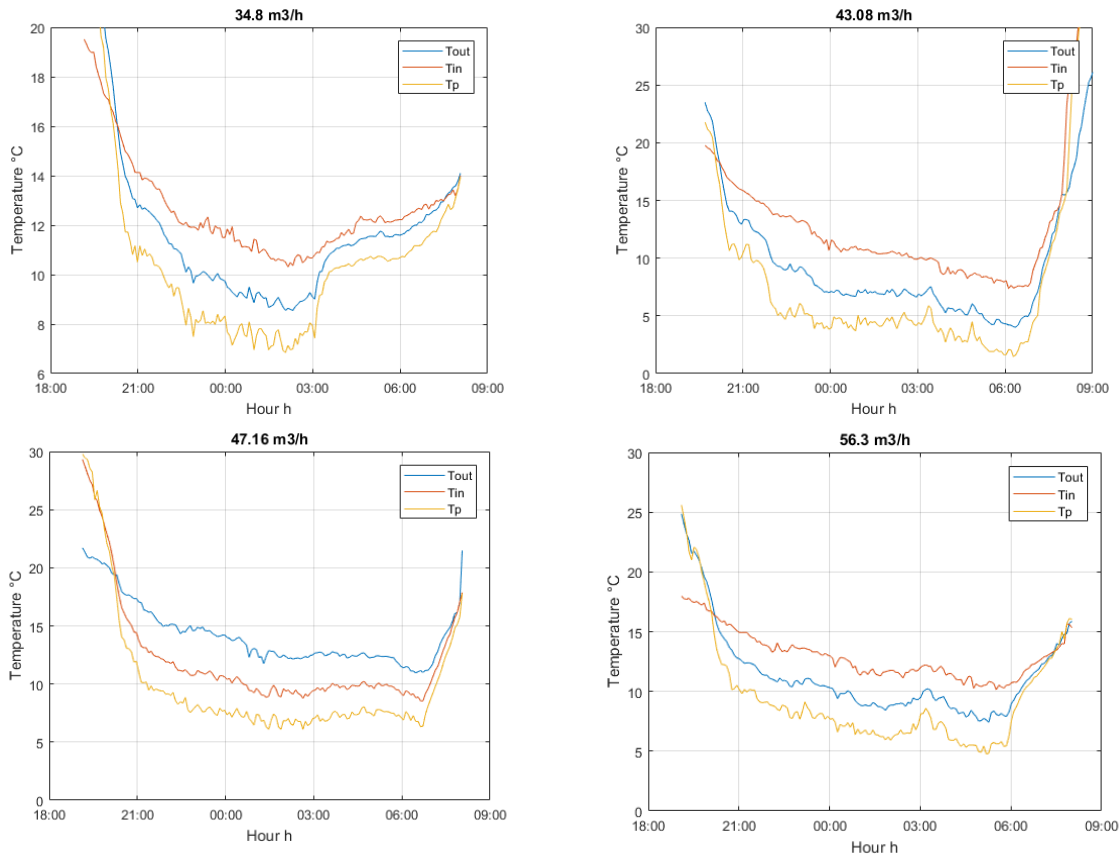


Gráfico 10 comportamiento de radiador nocturno aire radiación para distintos caudales. las mediciones fueron realizadas en días distintos.

No obstante, se puede ver en el gráfico 10 que en todas las mediciones realizadas al equipo disminuyó la temperatura de salida del aire, la mínima temperatura que puede alcanzar el aire es la temperatura de la placa. Cabe destacar que estas mediciones fueron realizadas en días distintos en donde el potencial de enfriamiento no es exactamente el mismo, pero al ser realizadas el mismo mes pueden ser comparadas para el análisis. La temperatura de placa T_p depende del potencial de enfriamiento nocturno de esa noche y del caudal de operación, puesto que, a mayor caudal la cantidad de energía que debe disipar la placa es mayor. Respecto a la diferencia de temperaturas entre simulaciones, se intuye que los mejores resultados no serán en el caudal más bajo de operación, debido a que, al aumentar el caudal este se torna en un régimen turbulento aumentando la transferencia de calor.

Para poder entender de mejor manera el efecto del flujo másico sobre la temperatura de salida del fluido, se gráfica la diferencia de temperatura entre la entrada y la salida del colector para los casos anteriores.

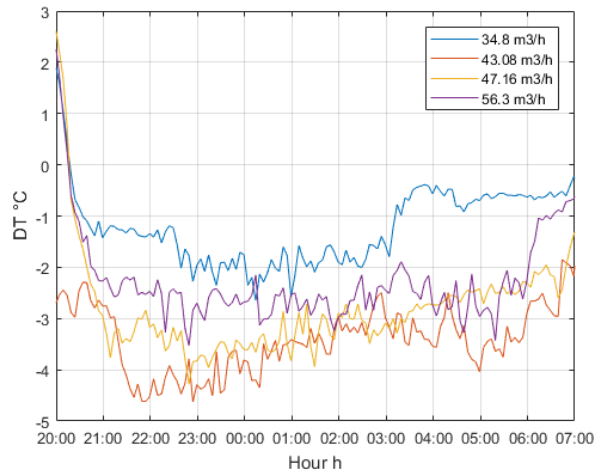


Gráfico 11 Representa la comparación de la diferencia de temperatura entre la entrada y salida del colector.

En las pruebas realizadas en el radiador nocturno aire radiación se aprecia que las mayores diferencias de temperatura se produjeron en los caudales de 43.08 y 47.16 $\frac{m^3}{h}$. En comparación con caudales menores como 34.8 $\frac{m^3}{h}$ que al tener un menor flujo másico, estar cerca de la zona de inestabilidad del ventilador y requerir menos energía para variar la temperatura de salida, no alcanzan a realizar la turbulencia necesaria dentro del colector para maximizar la transferencia de calor. Analizando el gráfico 11 se puede apreciar que la medición de 56.3 $\frac{m^3}{h}$ presenta una menor diferencia de temperatura entre entrada y salida, respecto a las mediciones realizadas a caudales menores, porque, un mayor flujo másico tiene la necesidad de una mayor potencia de enfriamiento para producir una diferencia de temperatura en el flujo. Como caso de análisis vamos a tomar la medición de 43.08 $\frac{m^3}{h}$ puesto que, es la medición que presenta la mayor diferencia de temperatura y se logró dentro del sistema con la velocidad baja del ventilador consumiendo una menor energía. Vamos a descartar el caso cuando el caudal es 47.16 $\frac{m^3}{h}$, aunque es similar en resultados, pero, este fue realizado en la velocidad alta del ventilador.

Para comenzar el análisis primero debemos conocer las condiciones ambientales del día de medición para poder calcular el potencial de enfriamiento teórico que permiten este día. La medición de las condiciones climáticas se realizó con una estación meteorológica instalada al costado del experimento en el techo de la casa fénix II. Esta estación registra mediciones de temperatura ambiente, humedad relativa y velocidad del viento, estos datos son ingresados a una correlación que nos permite conocer la temperatura de cielo.

Las condiciones climáticas para el día de medición fueron:

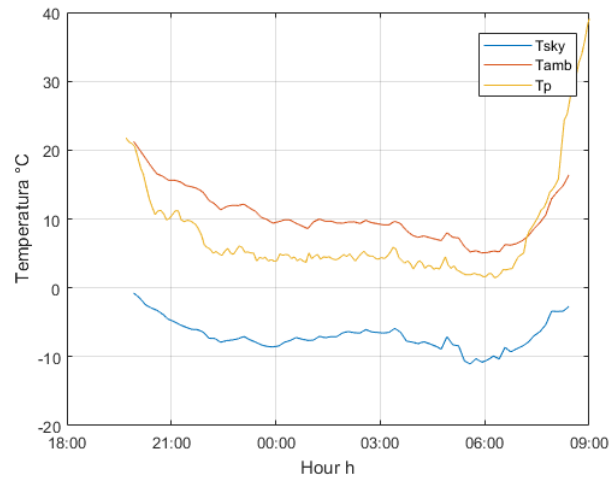


Gráfico 12 Temperatura medida al ambiente, superficie del colector y cálculo de temperatura de cielo para el día 24-11 a las 8 pm a 25-11 a las 8 am

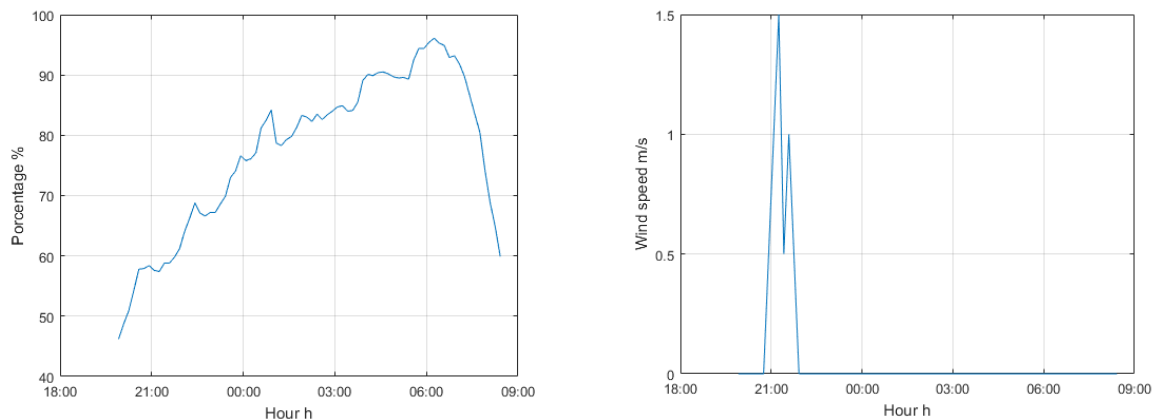


Gráfico 13 Humedad relativa y velocidad de viento en LER, ubicado en Quilpué. Para el día 24-11 al 25-11.

El cálculo de la temperatura de cielo se realizó con el desarrollo experimental presentado en la sección “cálculo de temperatura de cielo”, utilizando las condiciones ambientales anteriormente presentadas. La potencia de enfriamiento teórica llamada así, porque, se obtiene de las condiciones ambientales y con la temperatura de placa de operación del colector aire-radiación. Es calculada con el desarrollo experimental presentado en la sección “Balance de energía en la superficie” y esta presentada en el gráfico 15. Este potencial nos muestra cual es la capacidad de enfriamiento máximo que tendrá el radiador nocturno aire-radiación.

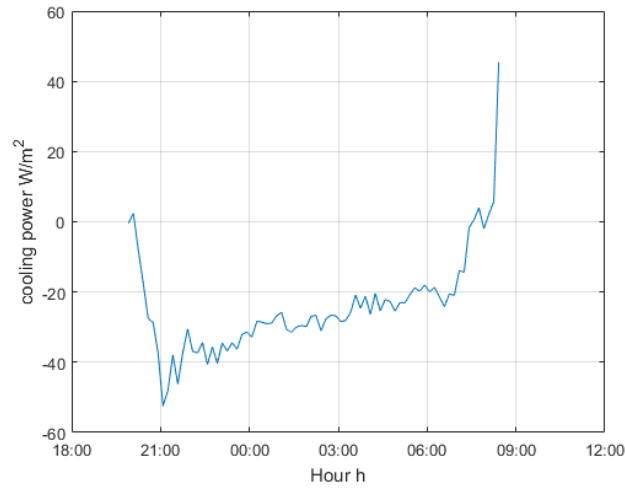


Gráfico 14 Calculo de potencial de enfriamiento calculada del sistema para el caudal de $43.08 \frac{m^3}{h}$, para el día 24-11 a las 8 pm a 25-11 a las 8 am

En el gráfico 15 se muestran las temperaturas de operación que alcanzo el sistema cuando operaba a $43.08 \frac{m^3}{h}$. Con esta información se realizó un balance de energía con la ecuación 25 y 26 entre la entrada y salida del flujo. Conociendo la capacidad calórica del aire a $10 [^{\circ}C]$ $1.006 [kJ/kgK]$, la diferencia de temperatura entre la entrada y la salida del radiador nocturno y el flujo másico de operación.

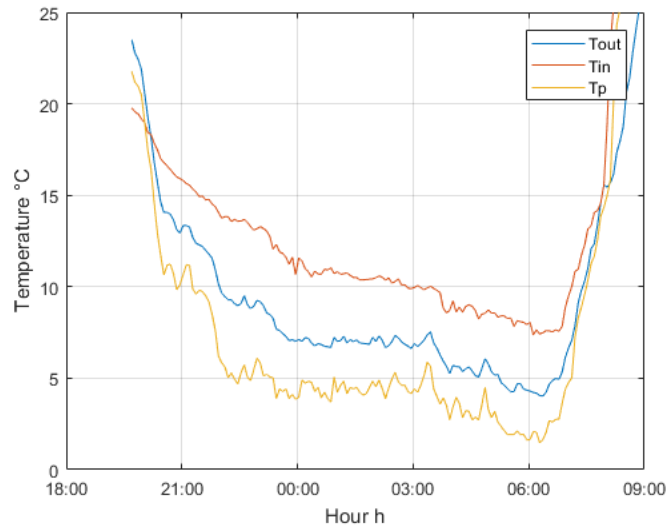


Gráfico 15 temperaturas de entrada, salida del colector y temperatura de placa para un caudal de $43.08 \frac{m^3}{h}$. Para el día 24-11 a las 8 pm a 25-11 a las 8 am

$$\Delta T = T_{salida} - T_{entrada} \quad [25]$$

$$Q_{real} = \dot{m}c\Delta T \quad [26]$$

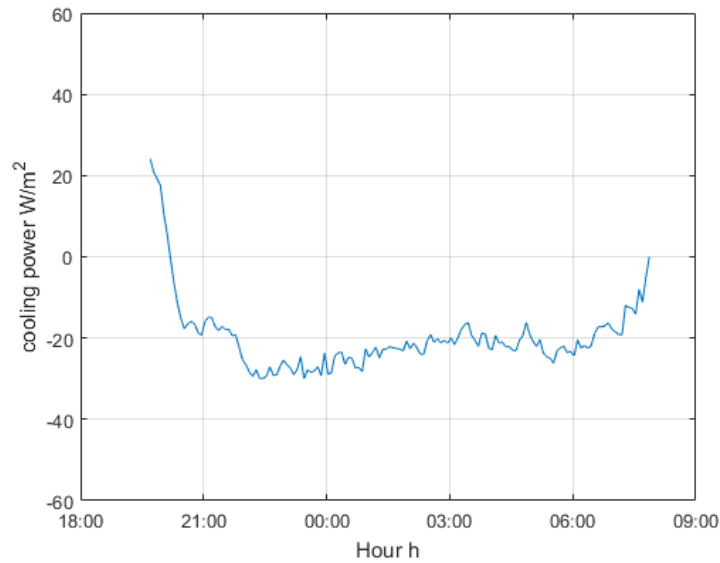


Gráfico 16 potencia real de enfriamiento del sistema, calculada con un balance de energía en el colector, para el día 24-11 a las 8 pm a 25-11 a las 8 am

Al realizar la comparación entre los *gráficos 15 y 16* se puede saber cuál es la cantidad de energía que realmente se transfiere al fluido y la energía que sale de la superficie disipadora. La principal diferencia de potencia que sale del colector y potencia de enfriamiento del fluido se aprecia en las primeras horas de funcionamiento del radiador nocturno, porque, este se encuentra a una alta temperatura, debido a, la exposición a la radiación solar del día. Este tipo de fenómeno podría disminuir su efecto al instalar un sistema de sombra sobre el radiador nocturno. Ya superado el fenómeno en el cual el colector baja su temperatura comienza un funcionamiento que podría considerarse como estacionario y el potencial de enfriamiento teórico se asemeja al real. Para obtener una mejor visión al respecto graficaremos la potencia de enfriamiento real del aire sobre la teórica.

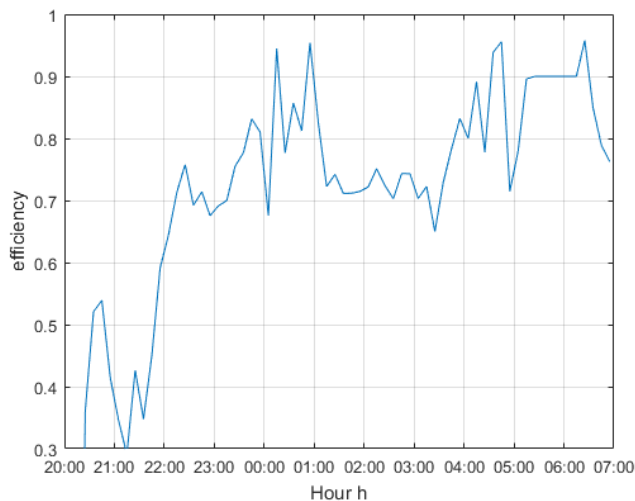


Gráfico 17 eficiencia del radiador nocturno aire radiación.

En el *grafico 17* se aprecia que la eficiencia es mayor posterior a las 23 *hr* y se mantiene sobre el 70 % durante el periodo de operación. La eficiencia promedio de la medición fue de 71 %, el estudio de esta eficiencia puede ser realizado posteriormente mediante la prueba de nuevas geometrías de circulación interna del aire que maximicen el área de transferencia de calor y sombra en el periodo diurno.

Muro de acumulación

El muro de acumulación es un elemento del sistema destinado a la acumulación de frío durante el periodo de funcionamiento del sistema, y así, mantener la inercia térmica del lugar a climatizar. A continuación, se presenta la temperatura del muro de acumulación en un periodo de dos días.

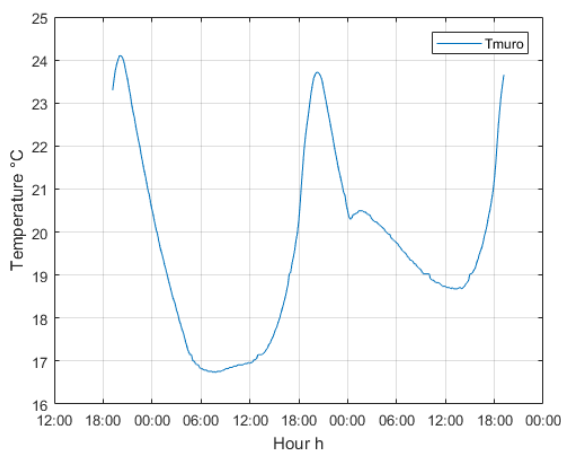


Gráfico 18 temperatura de muro de acumulación de frío entre el 3/02 al 05/02.

El promedio de la temperatura del muro para el mes de enero y febrero fue de 19,6 [°C]. Las variaciones de temperatura entre el comienzo del funcionamiento del sistema a las 19 *hr* y el apagado a las 8 *hr* es de 7 y 5 ± 1 [°C] aproximadamente para los días graficados. La energía que fue capaz de acumular el muro es de 4.3 MJ cuando la variación de temperatura fue de 7 °C, esta energía es suficiente para congelar 13 kg de hielo.

Temperatura interna de la casa

El principal objetivo de este sistema es lograr disminuir la carga térmica en climatización del espacio en donde se encuentra instalado. Utilizando el sistema en un caudal de $43.08 \frac{m^3}{h}$ se puso en funcionamiento el sistema de aire-radiación durante un mes. En el *grafico 19* se presentan los resultados de 10 días de medición.

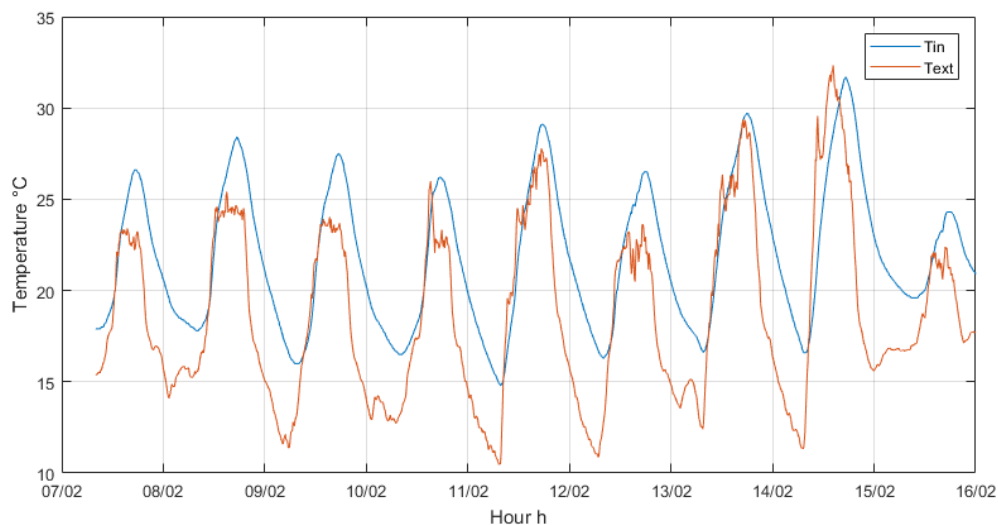


Gráfico 19 Medición de temperaturas internas y externas de casa Fénix 2.

Para continuar con el análisis de la diferencia de temperatura, el promedio de la temperatura interna de la casa para la muestra anterior es de $21.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la desviación estándar es de $4.1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Lo cual indica que el 68% de los datos se encuentran entre las mediciones $21.9 \pm 4.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ considerando que este sistema está pensado como un complemento a un sistema convencional de climatización.

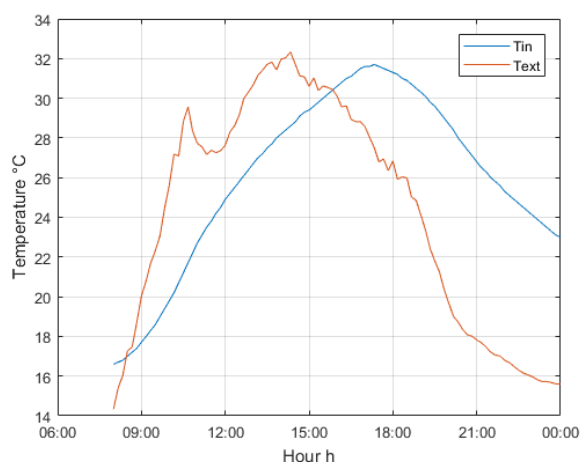


Gráfico 20 Comparación entre la temperatura exterior y la temperatura interior de la casa Fénix 2. Para el día 15/02.

El gráfico 20, se presenta la diferencia de temperatura en función de la hora para un buen día de medición, se puede extraer que la casa alcanza los $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ a las 11 am y el interior de la casa se equipara con la temperatura exterior alrededor de las 4 pm. Si este sistema se encontrara en apoyo a un sistema de bomba de calor programado en $22\text{ }^{\circ}\text{C}$, este debería encender desde las 11 am y no a las 9 am. Este ahorro de dos horas en el encendido es uno de los primeros beneficios de la instalación de este sistema. Considerando un sistema de aire acondicionado de potencia nominal 700 w, que debe ser encendido dos horas menos al día, generando un ahorro de 1,4 kWh al día. Se debe mencionar que estas mediciones fueron realizadas en la casa Fénix II, la cual fue facilitada por el departamento de Arquitectura de la UTFSM. Esta casa tiene una aislación destacada en las paredes y techos, pero, al tener paredes

desmontables tiene grandes infiltraciones de aire que afectaron los resultados de la temperatura interna de la casa y no se puede conocer a la perfección el efecto del sistema.

5.2 Resultados sistema agua-radiación

Radiador nocturno tipo colector solar sin vidrio

El sistema de enfriamiento con agua consta de 3 elementos esenciales: radiador nocturno tipo colector solar sin vidrio, un estanque de acumulación y un radiador llamado unidad terminal al interior de la casa. En ambos equipos como se mencionó en el plan de medición se encuentran instalados sensores de temperatura en la entra y salida del flujo másico y también en la superficie.

Los resultados de estos equipos se presentan a continuación para días distintos, debido a que, no se pudo obtener una medición en paralelo de los tres equipos en funcionamiento. Por esto, el análisis será del funcionamiento como unidades separadas.

a) 3 lt/min

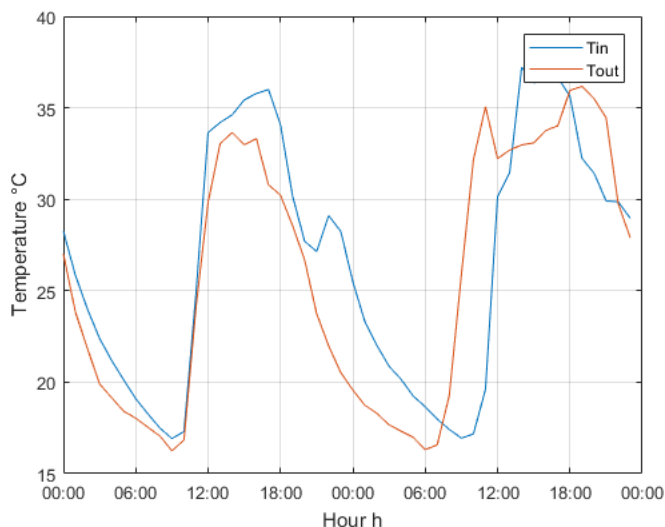


Gráfico 14 temperatura de entrada y salida de colector solar sin vidrio

En el *grafico 14* se aprecia que el radiador nocturno agua-radiación es capaz de enfriar el agua que circula por su interior y en los horarios diurnos desde las 6 de la mañana comienza a calentar el agua actuando como un colector solar. El sistema fue capaz de reducir la temperatura del agua hasta 6 °C en comparación ente la entrada y la salida, como el agua que circula por el radiador nocturno viene desde el estanque de acumulación. En un ciclo de operación el colector agua-radiación es capaz de enfriar 18 °C una masa de 50 lt de agua, esta cantidad de energía corresponde a 3.7 MJ.

Techo de cobre

El techo de cobre es el encargado de absorber calor desde el interior de la casa, este tiene una dimensión de 1 m de largo, 0.5 m de ancho y está formado por 7 tubos. En el siguiente gráfico se presentará la medición de temperaturas de entrada y salida del agua y de la superficie de cobre, realizada en el periodo de operación de dos días

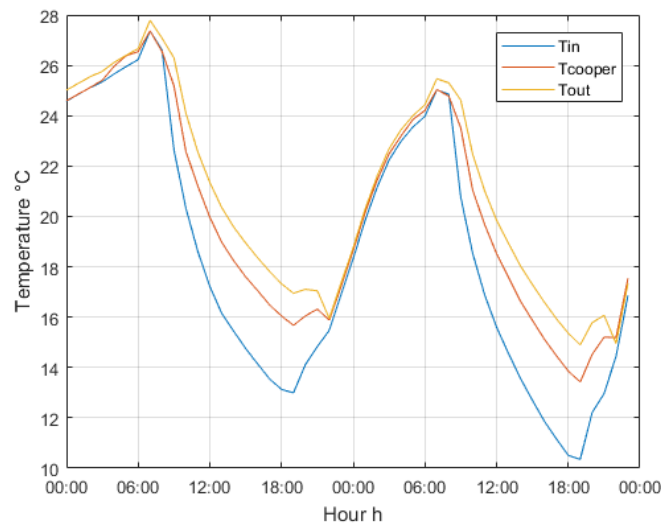


Gráfico 16 temperaturas techo interior de cobre

En el *grafico 16* se puede apreciar el funcionamiento del techo de cobre y que el agua que circula en el colector solar sin vidrio sube su temperatura, lo cual refleja un intercambio de calor con el medio externo. La temperatura del techo de cobre graficada en rojo es a la cual se produce la transferencia de calor con el ambiente de la casa. La diferencia de temperatura entre la entrada y salida aumenta con el tiempo de funcionamiento del equipo, debido a que, la temperatura ambiente de la casa aumenta con el pasar de las horas del día generando un mayor flujo de calor.

Estanque de acumulación

El estanque de acumulación es un estanque de plástico de 50 Lt en donde se acumula el agua del circuito cerrado que circula por el colector solar sin vidrio y la unidad terminal. En el siguiente gráfico se presentará el promedio de las temperaturas del estanque, las cuales corresponden a la parte superior e inferior de él.

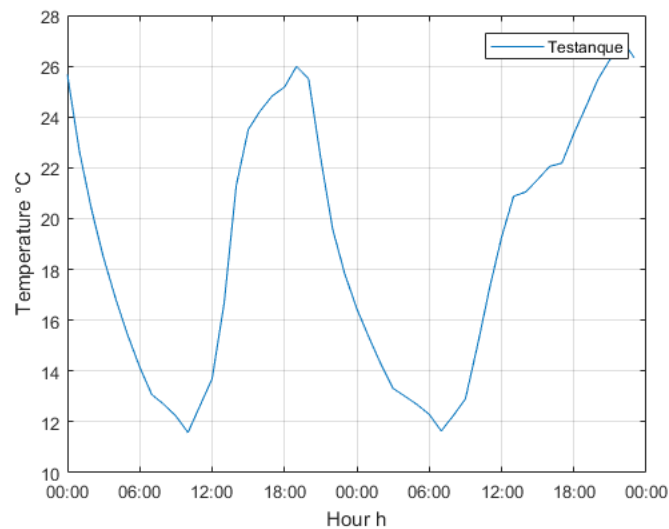


Gráfico 17 temperatura estanque de acumulación.

En el *gráfico 17* se puede apreciar que el agua dentro del estanque de acumulación tiene una fluctuación térmica de 13 °C aproximadamente para ambos días. Considerando que la capacidad calórica del agua es de $4,186 \frac{KJ}{KgK}$, con la *ecuación 27* se puede calcular la energía que el sistema es capaz de acumular en un día de funcionamiento.

$$Q = cM_{estanque}\Delta T \quad [27]$$

$$Q = 2720,9[KJ]$$

6 Conclusiones

Este trabajo tenía como objetivo el diseño y construcción de dos prototipos de radiador nocturno siendo aire-radiación y colector solar sin vidrio, para evaluar su potencial como método de refrigeración pasivo. En el desarrollo de este documento se pone en evidencia que es posible el diseño a un nivel de prototipo y se realizan pruebas del funcionamiento de los sistemas.

Respecto al diseño de los prototipos, es necesario en ambos casos tener sistemas de acumulación de frío, para poder utilizar ese potencial de enfriamiento en las horas diurnas. También las dimensiones del radiador nocturno adoptaron medidas estudiadas a través de simulaciones, pero se fijaron los tamaños para crear unidades comerciales y de fácil manipulación e instalación.

Las simulaciones realizadas al sistema aire radiación presentan resultados mayores en el enfriamiento de aire, respecto a las mediciones realizadas a los equipos en los mismos caudales de operación. Esto se debe a que, el modelo no considero las ganancias de calor externas sobre el colector, ni efectos de calentamiento diurno del equipo. Solamente considero las ganancias convectivas sobre el radiador nocturno. La simulación no considero que el ventilador a bajos caudales tiene zonas de inestabilidad de caudal que afectan en la generación de turbulencias internas del radiador nocturno.

El funcionamiento de los radiadores nocturnos refleja que son capaces de disipar calor alrededor de 4 MJ en promedio para cada periodo de operación, lo cual es suficiente para enfriar alrededor de 10 kg de hielo. Tal como los pueblos persas en la antigüedad utilizaban este tipo de tecnología.

La temperatura interna de la casa presento variaciones respecto a la temperatura exterior, cuando el sistema aire-radiación se encontró en funcionamiento a un caudal de operación de $43.08 \frac{m^3}{h}$. Las cuales provocaron en la mantener la temperatura interna de la casa bajo los 22 °C hasta las 11 am sin necesidad de algún sistema auxiliar de climatización, cuando la temperatura externa era superior. Pero esta medición no es significativa, debido a que, la casa Fénix II tiene paredes desmontables que tienen infiltraciones de aire en las uniones, que afectaron en las mediciones de temperatura interna.

Para finalizar, se entiende que la instalación de este tipo de sistemas es viable dentro de viviendas, debido a que, no es invasivo en la habitabilidad del lugar. Aunque los resultados mostraron que el sistema era capaz de enfriar aire o agua y transportar calor desde el interior de la vivienda hacia el cielo nocturno, se deben realizar nuevas pruebas en un ambiente controlado para conocer los reales efectos dentro de la temperatura de la casa.

7 Propuestas de mejora al sistema

A pesar de los resultados obtenidos los sistemas diseñados aun cuentan con puntos de mejora en su funcionamiento y diseño

- Se propone realizar sombreado a los radiadores nocturnos con el fin de que, la temperatura inicial de funcionamiento sea menor y conseguir una mayor transferencia de calor al aire.
- El estudio de nuevas geometrías de circulación interna del aire que maximicen el área de transferencia de calor y así, la transferencia de calor interior del colector.
- Realizar una aislación de las tuberías y en el estanque de acumulación del sistema agua-radiación del sistema para disminuir las pérdidas de calor.
- Realizar un sellado de las infiltraciones de aire en el lugar donde se realicen nuevas pruebas al prototipo.
- Para el sistema agua radiación se diseñó un circuito que permite utilizar tanto disipar calor en la noche y captar calor en el día (anexo3).

No esta demás decir que estas son acotaciones detectadas durante el desarrollo del experimento y el total de nuevas problemáticas u obstáculos, debes ser detectadas por el experimentador en las nuevas condiciones de operación.

Referencias

- Bahadori, M. (1978). Passive cooling systems in Iranian architecture. *Scientific American*, 144-154.
- Barrios, J. (2018). *Estudio experimental del potencial de refrigeración por radiación nocturna de una placa plana bajo diferentes condiciones de operación*.
- cosmoplas. (2017). *catalogo de productos*.
- energía, M. d. (2016). *Energía 2050*.
- Frigerio, Á. B. (2001). *La radiación noctur*.
- Givoni, B. (1994). *Passive and low energy cooling of buildings*.
- González, D. E. (2002). *Enfriamiento radiativo en edificaciones*. Guadalajara: Universidad de Guadalajara.
- J.P Busano, E. F. (2006). Nuevos estudios sobre radiación nocturna en Cachi.
- M. Victoria Mercado, A. E. (2013). *Enfriamiento pasivo: Cálculo y experimentación de un sistema de enfriamiento radiante*. Mendoza.
- Rouaud, M. (2013). *Probability, statistics and estimation. Propagation of uncertainties*.
- W.Keys. (1966). *Convective heat and mass transfer*. New York: McGraw-Hill.

Anexo

1.



Ilustración 5 ventilador axial utilizado en el sistema aire-radiación.

2.



Ilustración 6 bomba de circulación utilizada en el sistema agua-radiación

3.

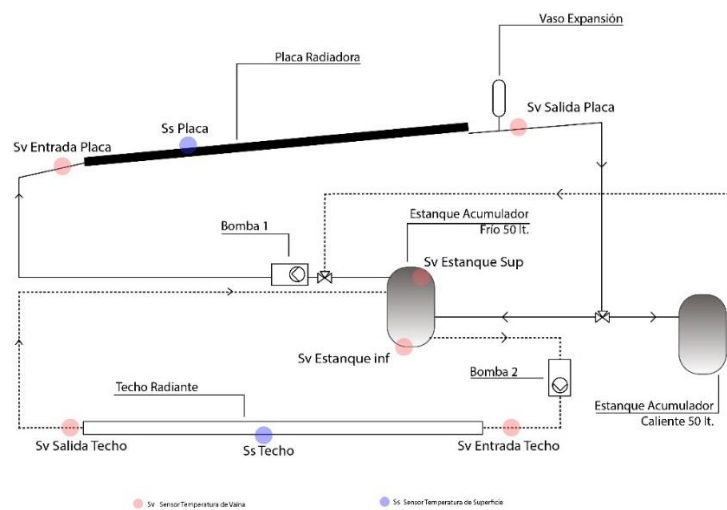


Ilustración 7 propuesta de sistema para el sistema agua radiación. Para el funcionamiento tanto para enfriar agua como calentar agua.

4.

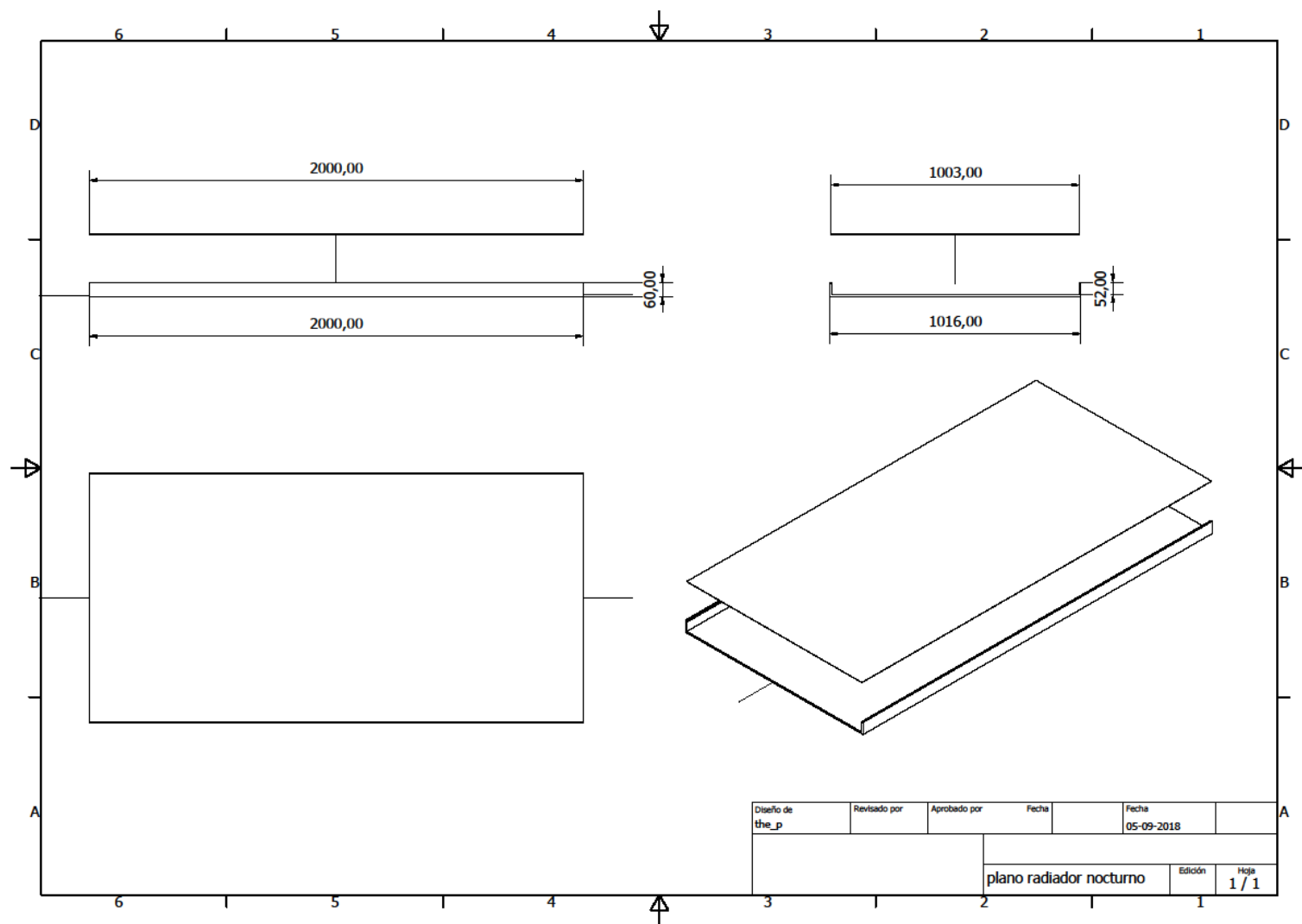


Ilustración 8 plano radiador nocturno aire-radiación.

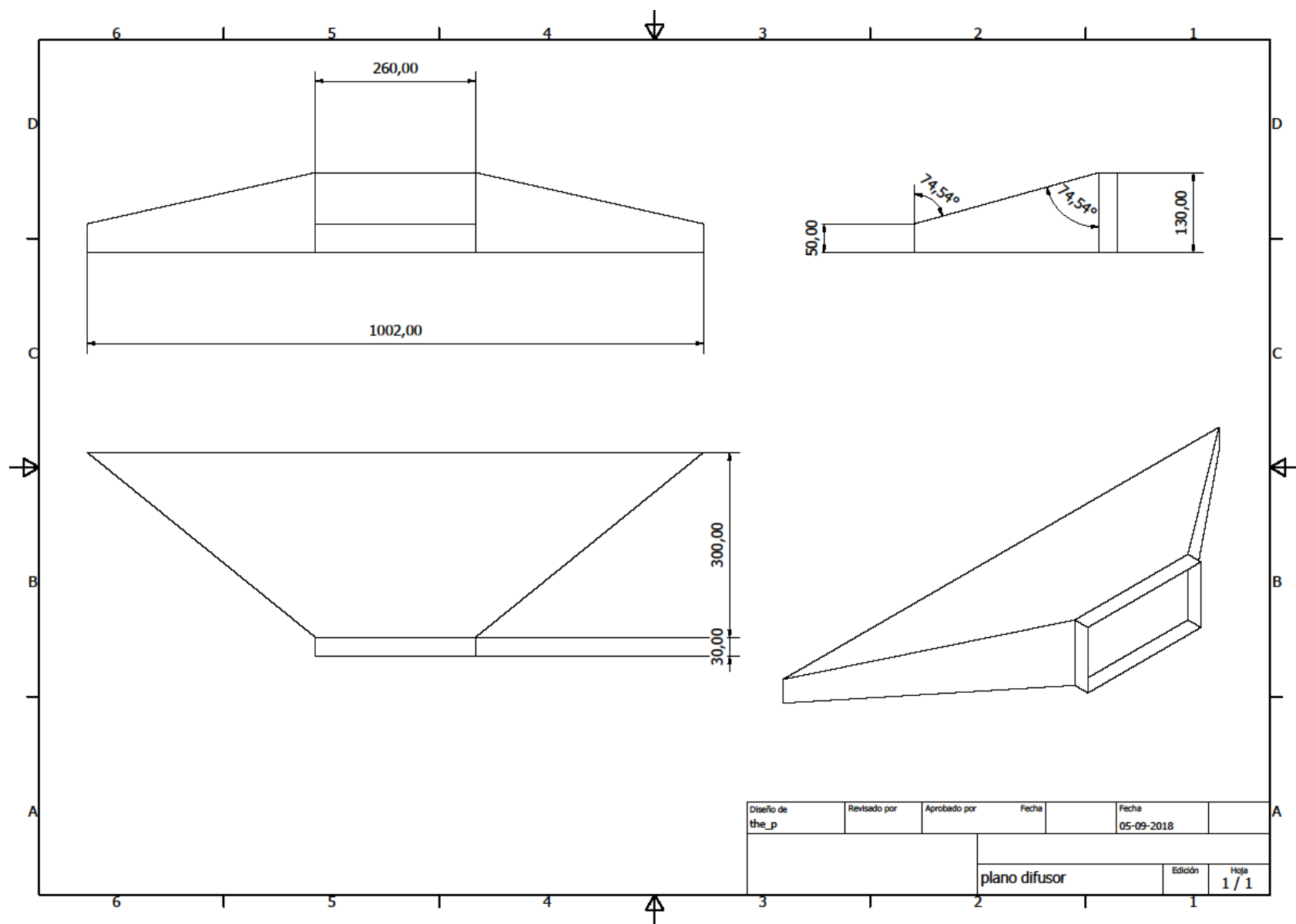


Ilustración 9 plano difusor radiador nocturno aire-radiación