



## DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UN PROTOTIPO DE EVAPORADOR SOLAR QUE CUBRA MAYOR SUPERFICIE DE EVAPORACIÓN.

Camila Toledo Riffo<sup>1</sup>; Mauricio Villagrán Valenzuela<sup>2</sup>; P. Salgado Mendoza<sup>3</sup>

### RESUMEN:

El presente proyecto aborda el diseño, construcción y evaluación de un prototipo de evaporador solar flotante para la producción eficiente de agua destilada, para su aplicación industrial, como el tratamiento de aguas en relaves mineros. Este dispositivo aprovecha energía renovable, como la radiación solar y la temperatura ambiental, para destilar agua, permitiendo su reutilización en procesos productivos y contribuyendo a la sostenibilidad en sectores industriales.

En una primera etapa, se realizó un análisis de las tecnologías existentes, identificando los principios fundamentales y mejores prácticas de diseño de evaporadores solares. A partir de este análisis, se diseñó un prototipo experimental que incorpora una geometría flotante, materiales resistentes a condiciones climáticas de la zona. Posteriormente, se procedió a la construcción del evaporador utilizando materiales accesibles y duraderos. Para evaluar su rendimiento, se llevaron a cabo pruebas experimentales tanto en laboratorio, bajo condiciones controladas, como en exteriores, considerando su operación en cuerpos de agua al aire libre. Los resultados mostraron que el prototipo es capaz de producir agua destilada de forma sostenible y eficiente, destacando el impacto de la radiación solar y la temperatura en su desempeño.

### PALABRAS CLAVES:

Energía solar, destilador solar, radiación, calor, temperatura, transferencia, evaporación, condensación.

### ABSTRACT:

This project addresses the design, construction and evaluation of a floating solar evaporator prototype for the efficient production of distilled water for industrial applications, such as water treatment in mine tailings. This device takes advantage of renewable energy, such as solar radiation and ambient temperature, to distill water, allowing its reuse in production processes and contributing to sustainability in industrial sectors.

In a first stage, an analysis of existing technologies was carried out, identifying the fundamental principles and best practices in the design of solar evaporators. Based on this analysis, an experimental prototype was designed that incorporates a floating geometry and materials resistant to the climatic conditions of the area. Subsequently, the evaporator was built using accessible and durable materials. To evaluate its performance, experimental tests were carried out both in the laboratory, under controlled conditions, and outdoors, considering its operation in open-air bodies of water. The results showed that the prototype is capable of producing distilled water in a sustainable and efficient manner, highlighting the impact of solar radiation and temperature on its performance.

### KEYWORDS:

Solar energy, solar still, radiation, heat, temperature, transfer, evaporation, condensation.

<sup>1</sup> Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [ctoledor@ing.ucsc.cl](mailto:ctoledor@ing.ucsc.cl)

<sup>2</sup> Profesor Guía, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [mvillagran@ucsc.cl](mailto:mvillagran@ucsc.cl)

<sup>3</sup> Profesor Informante, Depto. de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [psalgado@ucsc.cl](mailto:psalgado@ucsc.cl)



## 1. INTRODUCCIÓN

La escasez de agua potable es un desafío creciente que afecta a muchas regiones alrededor del mundo, y el acceso a fuentes de agua seguras se ve amenazado por el cambio climático, el crecimiento demográfico y la degradación ambiental. Según un informe de las Naciones Unidas, más de 2 mil millones de personas carecen de acceso a agua potable segura, y se espera que esta situación empeore debido al cambio climático y la urbanización (ONU, 2021). Frente a esta problemática, es fundamental desarrollar tecnologías sostenibles que permitan obtener agua pura de forma eficiente, especialmente en áreas de difícil acceso o con recursos limitados (Gleick, 2018). Se han desarrollado diversas tecnologías para abordar la escasez de agua, incluyendo plantas desalinizadoras, sistemas de recolección de agua de lluvia y dispositivos portátiles de purificación. Sin embargo, estas soluciones presentan limitaciones como altos costos, dependencia de fuentes energéticas no renovables.

En este contexto, los evaporadores solares representan una alternativa sostenible para la gestión y reutilización de recursos hídricos. Estos dispositivos aprovechan la energía solar para destilar agua, eliminando impurezas y microorganismos, sin requerir electricidad ni combustibles fósiles. Además, el diseño propuesto incluye la capacidad de flotar, lo que lo hace particularmente útil en aplicaciones industriales, como el tratamiento de aguas en relaves mineros. Al instalarse directamente en estas superficies acuáticas, el dispositivo no solo permite destilar el agua para darle un segundo uso, sino que también contribuye a minimizar el impacto ambiental asociado con la acumulación de relaves. Este enfoque podría beneficiar especialmente a la industria minera, que enfrenta crecientes demandas de sostenibilidad y gestión eficiente de recursos hídricos.

Si bien existen modelos comerciales y experimentales, persisten desafíos relacionados con la eficiencia del proceso, la durabilidad de los materiales y la adaptabilidad a distintas condiciones climáticas e industriales. Por ello, resulta fundamental desarrollar prototipos que superen estas limitaciones, optimizando su diseño y funcionalidad. Este estudio permitirá identificar las mejores prácticas de diseño y guiará la selección de materiales y componentes que asegurarán un óptimo rendimiento y una larga vida útil (Tiwari et al., 2020)

El presente proyecto tiene como objetivo principal el diseño, construcción y evaluación de un prototipo de evaporador solar flotante que sea eficiente, compacto y duradero. Este dispositivo busca proporcionar una solución práctica y sostenible para la obtención de agua destilada, promoviendo su implementación en entornos industriales, y contribuyendo a la reutilización de recursos hídricos en procesos productivos.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo General

- Diseñar y caracterizar un prototipo de evaporador solar flotante que sea autocontenido, capaz de operar en superficies acuáticas como relaves mineros y adaptable para interconectarse con otros dispositivos similares.

### 2.2 Objetivos Específicos

- Realizar un estudio detallado del funcionamiento de los evaporadores solares, identificando sus principales características y ventajas.
- Diseñar y construir el prototipo experimental del evaporador solar tipo, considerando aspectos como la geometría, los materiales, los sistemas de control de temperatura y flujo.
- Realizar pruebas experimentales para evaluar el desempeño del evaporador solar en términos de eficiencia de evaporación, producción de agua destilada y calor almacenado.
- Caracterizar el rendimiento del nuevo evaporador solar flotante y compararlo con otros dispositivos similares desarrollados experimentalmente.

## 3. MARCO TEÓRICO

### 3.1 Energía Solar

La energía solar es una fuente limpia, renovable e inagotable obtenida a partir de la radiación electromagnética del sol. Su aprovechamiento puede realizarse mediante tecnologías fotovoltaicas para generar electricidad o tecnologías fototérmicas para producir calor. En este proyecto, se utiliza la energía solar térmica para el proceso de destilación de agua, ya que es una solución eficiente y sostenible en términos de aprovechamiento energético (Garg & Agarwal, 2000).

### 3.2 Radiación Térmica

La radiación térmica es uno de los mecanismos de transferencia de calor, y se produce cuando el calor se transfiere a través de ondas o partículas hacia un punto determinado. Este proceso termodinámico ocurre cuando un sistema cambia de un estado de equilibrio a otro debido a un aumento de temperatura (Incropera & DeWitt, 2011). A medida que la temperatura aumenta, las partículas adquieren mayor energía cinética, lo que facilita la transferencia de calor de distintas maneras:

- **Conducción:** Implica la transmisión de energía cinética de partículas más energéticas a otras menos energéticas. En gases y líquidos, la conducción ocurre por colisiones y difusión de moléculas en movimiento aleatorio (Howell et al., 2011).
- **Convección:** Se produce cuando un fluido (líquido o gas) entra en contacto con una superficie sólida. Este proceso combina conducción y el movimiento del fluido, y la velocidad del fluido mejora la transferencia de calor (Howell et al., 2011).
- **Radiación:** La radiación térmica es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas. Este proceso ocurre debido a cambios en la configuración de los átomos y moléculas, y no se ve afectado por el vacío (Howell et al., 2011).



La radiación térmica se transmite por ondas electromagnéticas que van desde ondas de radio hasta luz visible e infrarroja. La radiación infrarroja es la más relevante en la transferencia de calor, ya que es la forma de energía que emiten los cuerpos a temperaturas comunes. A diferencia de la conducción y la convección, la radiación térmica no necesita un medio (sólido, líquido o gas) y puede ocurrir en el vacío, como es el caso de la energía solar que llega a la Tierra (Howell et al., 2011).

Todos los cuerpos, independientemente de su estado físico, emiten radiación térmica, cuya cantidad y tipo dependen de la temperatura del cuerpo. A mayor temperatura, mayor es la radiación emitida, y las longitudes de onda se desplazan hacia frecuencias más altas, como la radiación visible o ultravioleta a temperaturas muy altas. La Ley de Stefan-Boltzmann establece que la potencia radiante total de un cuerpo negro es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta (Incropera & DeWitt, 2011). La Ley de Wien describe cómo la longitud de onda de máxima emisión cambia con la temperatura: a medida que la temperatura aumenta, la longitud de onda se desplaza hacia frecuencias más cortas (como la radiación visible o ultravioleta) (Incropera & DeWitt, 2011).

La radiación térmica puede ser absorbida, reflejada o transmitida cuando incide sobre una superficie. La absorción depende de las propiedades del material, siendo los materiales oscuros o rugosos los que absorben más radiación (Howell et al., 2011). Además, la radiación térmica se emite en todas direcciones, pero su distribución puede depender de la forma y orientación del cuerpo que la emite.

### 3.2.1 Cuerpo negro

El estudio de la radiación en un cuerpo negro es fundamental porque proporciona un marco teórico y práctico para optimizar procesos de transferencia de calor, diseñar sistemas de energía solar y analizar el comportamiento térmico de materiales en aplicaciones científicas y tecnológicas (Incropera & DeWitt, 2011). La cantidad máxima de radiación emitida desde la superficie de un cuerpo negro ocurre a una temperatura termodinámica específica ( $T_s$ ), la cual determina la intensidad de la radiación que el cuerpo negro emite (Incropera & DeWitt, 2011).

### 3.3 Transferencia de Calor

La transferencia de calor se refiere al proceso de determinar la cantidad de energía térmica (calor) transferida entre cuerpos o sistemas como resultado de una diferencia de temperatura. (Garg & Agarwal, 2000).

#### 3.3.1 Temperatura

En la naturaleza, la materia suele presentarse en uno de tres estados: sólido, líquido y gaseoso. Los cambios en el estado de la materia dependen de la temperatura a la que se expone la sustancia. Estos cambios de temperatura reciben diferentes denominaciones según el tipo de transición de estado que experimenta la materia (Çengel & Boles, 2015).

#### 3.3.2 Temperatura de saturación $T_{sat}$

Es la temperatura a la cual una sustancia cambia de fase, como de líquido a vapor o de vapor a líquido, bajo una presión determinada. Este fenómeno ocurre porque el equilibrio entre las fases líquida y gaseosa se establece a una combinación específica de temperatura y presión. Para que un líquido alcance su punto de vaporización, es necesario suministrarle una cantidad significativa de energía térmica conocida como calor latente de vaporización.

### 3.3.3 Temperatura de la condensación del agua

La condensación depende de la temperatura, la saturación y la presión. Ocurre cuando la temperatura desciende al punto de rocío, que varía según la presión, deteniendo el movimiento molecular. La saturación también depende de la presión y temperatura, mientras que la humedad relativa mide la proporción de vapor de agua en el aire respecto al total posible (Çengel & Boles, 2015).

### 3.4 Procesos termodinámicos (cambios de estado)

Los cambios de estado describen las transiciones físicas que ocurren cuando la materia pasa de una fase a otra (sólido, líquido o gas) debido a cambios en temperatura o presión. Estos procesos son fundamentales en sistemas naturales, y se clasifican como:

#### 3.4.1 Evaporación

La evaporación es un proceso físico en el que una sustancia en estado líquido se transforma en gas. Este fenómeno ocurre en la superficie del líquido, independientemente de la temperatura, y de forma gradual (Çengel & Boles, 2015). El proceso comienza cuando las moléculas en la superficie del líquido adquieren suficiente energía cinética para superar las fuerzas de atracción que las mantienen unidas en el estado líquido. La energía cinética es la energía asociada al movimiento de las partículas; al aumentar la temperatura, esta energía también aumenta, facilitando que las moléculas se separen y pasen al estado gaseoso.

$$Q_{\text{evaporación}} = m * L_V \quad (1)$$

Donde  $Q_{\text{evaporación}}$  es el calor absorbido (J),  $m$  es la masa del líquido evaporado (kg) y  $L_V$  es el calor latente de vaporización (J/kg).

##### 3.4.1.1 Calor específico

El calor específico (también conocido como capacidad térmica específica o capacidad calórica específica) es la cantidad de calor necesaria para que una unidad de una sustancia aumente su temperatura en un grado Celsius. Este valor varía según el estado físico de la materia, ya que la estructura molecular de la sustancia influye en la transmisión de calor dentro del sistema de partículas.

Además, las condiciones de presión también afectan el calor específico: a mayor presión, el calor específico tiende a disminuir. La fórmula para calcular el calor específico de una sustancia es:

$$c = Q / (m * \Delta t) \quad (2)$$

Donde  $Q$  representa la transferencia de energía calórica entre el sistema y su entorno,  $m$  la masa del sistema y  $\Delta t$  la variación de temperatura al cual se lo somete.

##### 3.4.1.2 Calor latente de evaporación

El calor latente es la energía requerida por una cantidad de sustancia para cambiar de fase, de sólido a líquido (calor de fusión) o de líquido a gaseoso (calor de vaporización). Se debe tener en cuenta que esta energía en forma de calor se invierte para el cambio de fase y no para un aumento de la temperatura.

El paso de la fase líquida a la fase vapor requiere de un aporte de energía. La cantidad de energía  $Q$  necesaria para pasar una unidad de masa del estado líquido al estado vapor se denomina calor latente de evaporación ( $L_V$ ).

$$Q = m / L_V \quad (3)$$

Donde masa de agua evaporada y  $L$  Calor latente de evaporación (J/kg).

### 3.4.2 Condensación

La condensación es un cambio de estado de la materia, y consiste en el proceso mediante el cual un gas o un vapor se transforma en líquido. Este proceso es más común en vapores que en gases, y ocurre a presión atmosférica (1 atm) cuando disminuye la temperatura del gas o del vapor (Çengel & Boles, 2015). Por lo general, ocurre condensación cuando un gas o vapor se pone en contacto con una superficie fría, lo que hace que disminuya su temperatura y se transforme en líquido. Por eso, en las superficies frías se pueden ver pequeñas gotas de líquido correspondientes al gas o vapor condensado (Çengel & Boles, 2015).

$$Q_{\text{condensación}} = m * L_v \quad (4)$$

Donde  $Q_{\text{condensación}}$  es el calor liberado (J),  $m$  es la masa del vapor condensado (kg) y  $L_v$  es el calor latente de condensación (J/kg).

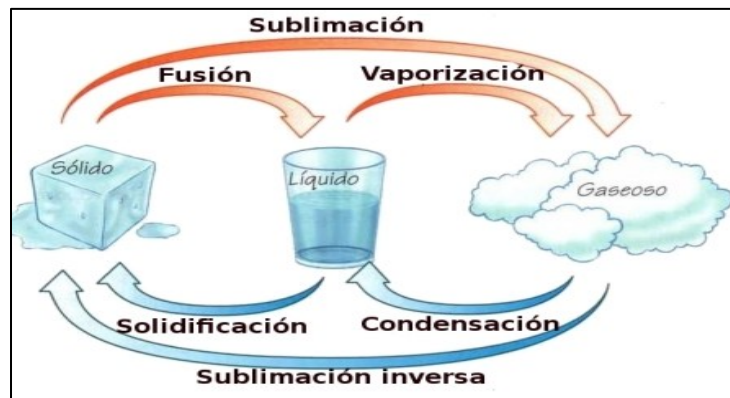


Imagen N°1: Transición de estados Fuente: WordPress.com

### 3.5 Evaporadores solares

Los evaporadores solares son dispositivos que aprovechan la energía del sol para evaporar agua y luego condensarla, obteniendo agua limpia o purificada. A continuación, se describen algunos tipos principales:

#### 3.5.1 Destilador Solar tipo Chales Wilson

Desarrollado en el desierto de Atacama, Chile, en 1872 por el ingeniero sueco Charles Wilson. Fue la primera planta destiladora para proveer agua en una zona con agua no potable debido a bacterias y sales. La planta de 4.000 m<sup>2</sup> utilizaba un molino de viento para elevar el agua hasta un estanque, donde el sol la calentaba a través de vidrios. Esta planta podía producir más de 20,000 litros de agua fresca diariamente en verano (Historia del Agua en el Desierto Más Árido del Mundo, 2012)



Imagen N°2: Máquina de Charles Wilson Fuente: <https://historiadelaagua.wordpress.com>

#### 3.5.2 Destilador Solar tipo invernadero

Este diseño es ideal para la destilación a gran escala, con una estructura en forma de invernadero construida con materiales translúcidos. La radiación solar intensifica el efecto térmico, facilitando la evaporación. El vapor se condensa en las paredes internas y, gracias a la inclinación del techo, el agua destilada se recoge en conductos o canaletas en la base (Procoler, 2022).

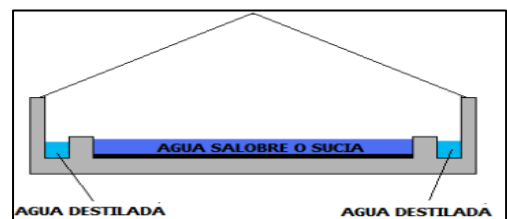


Imagen N°3: Destilador tipo invernadero Fuente: procoler. (2022). Destiladores

### 3.5.3 Destilador Solar tipo vertiente

Este modelo sencillo consiste en una caja cubierta por un cristal inclinado. La caja se divide en dos compartimentos: uno para el agua a evaporar (con fondo negro) y otro para recolectar el agua destilada. Algunos modelos permiten la interconexión modular, lo que facilita su expansión (Pérez, 2009; Hernández, 2011).

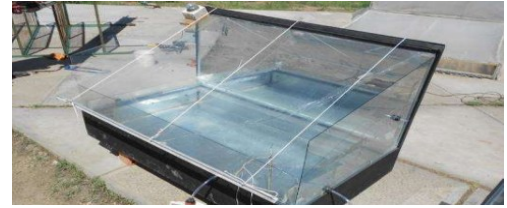


Imagen N°4: Destilador tipo vertiente  
 Fuente: procoler. (2022). Destiladores

### 3.5.4 Destilador Solar tipo dos vertientes

De alta eficiencia, este destilador tiene una estructura de doble inclinación que optimiza la evaporación y condensación. Fabricado con materiales transparentes, el agua se calienta en la bandeja de evaporación y el vapor se condensa en el techo inclinado. El agua destilada se recoge en un depósito debajo de la bandeja (González, 2013; López, 2017).

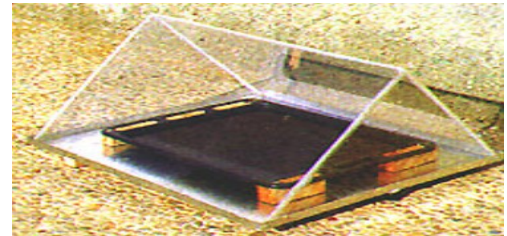


Imagen N°5: Destilador de dos vertientes  
 Fuente: procoler. (2022). Destiladores

### 3.5.5 Destilador Solar tipo cascada

Este modelo tiene escalones inclinados con bateas negras en cada nivel. El vidrio también está inclinado, permitiendo que el agua destilada descienda hasta el receptor en la parte inferior. El desagüe en la base recoge los residuos o salmuera resultantes de la evaporación (Martínez, 2012; Rodríguez, 2016).

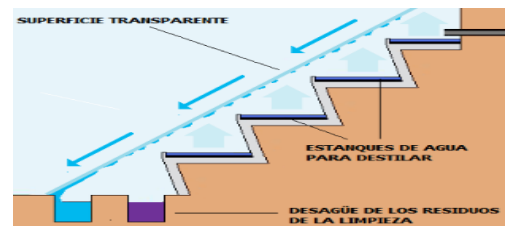


Imagen N°6: Destilador tipo cascada  
 Fuente: procoler. (2022). Destiladores

### 3.5.6 Destilador Solar tipo esférico de barrera

Este prototipo se caracteriza por su forma esférica, con superficies transparentes que maximizan la radiación solar. Su eficiencia se debe a la ausencia de sombra que obstruya la radiación. Además, cuenta con una barredera motorizada que limpia las paredes interiores y una bandeja central para el agua a destilar. Su forma esférica mejora la retención de calor, optimizando la producción de agua destilada (Mora, 2014; Vega, 2019).

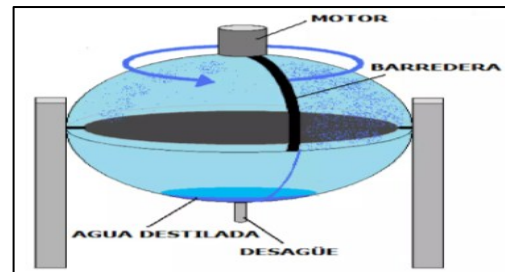


Imagen N°7: Destilador esférico de barrera  
 Fuente: Destilador solar.pptx2. (2024).

## 4. METODOLOGÍA

La metodología del estudio combina un enfoque experimental basado en el diseño y construcción de un evaporador solar, con ensayos realizados en laboratorio y al aire libre. Se evalúa el desempeño del sistema mediante mediciones controladas de parámetros clave, como la cantidad de agua destilada, irradiación solar y temperaturas del agua y ambiente.

El diseño sigue principios termodinámicos para maximizar la eficiencia del proceso, mientras que los ensayos generan datos precisos para validar su funcionamiento, optimizar el diseño y evaluar la eficiencia en condiciones reales. Los resultados permitirán mejorar el diseño y los materiales, maximizando la producción de agua destilada.

#### 4.1 Diseño conceptual

El prototipo de evaporador solar con forma de dona se justifica por su capacidad para optimizar la captación de radiación solar y mejorar la eficiencia del proceso de destilación. Su cúpula curva maximiza la reflexión de los rayos solares hacia la superficie de evaporación, lo que incrementa la temperatura del agua y favorece la evaporación. Además, la forma de dona proporciona flotabilidad, permitiendo que el sistema se use en cuerpos de agua, lo que lo hace versátil y adaptable a diversas condiciones. También se ha considerado la modularidad del diseño, lo que permite conectar varios evaporadores en serie para aumentar la capacidad de destilación y ajustarse a diferentes necesidades de producción de agua. Estos aspectos aseguran que el prototipo sea eficiente, flexible y escalable, respondiendo a los objetivos de optimizar el proceso de destilación solar y adaptarse a variadas condiciones operativas.

El diseño del prototipo cuenta con un área de incidencia solar de  $0.042 \text{ m}^2$ , lo que maximiza el aprovechamiento de la radiación solar gracias a su cúpula curva. Además, incluye un acumulador de agua para almacenar el agua destilada y una rejilla central que sostiene el filtro, permitiendo el contacto directo con el fluido contaminado y favoreciendo el proceso de evaporación y destilación.

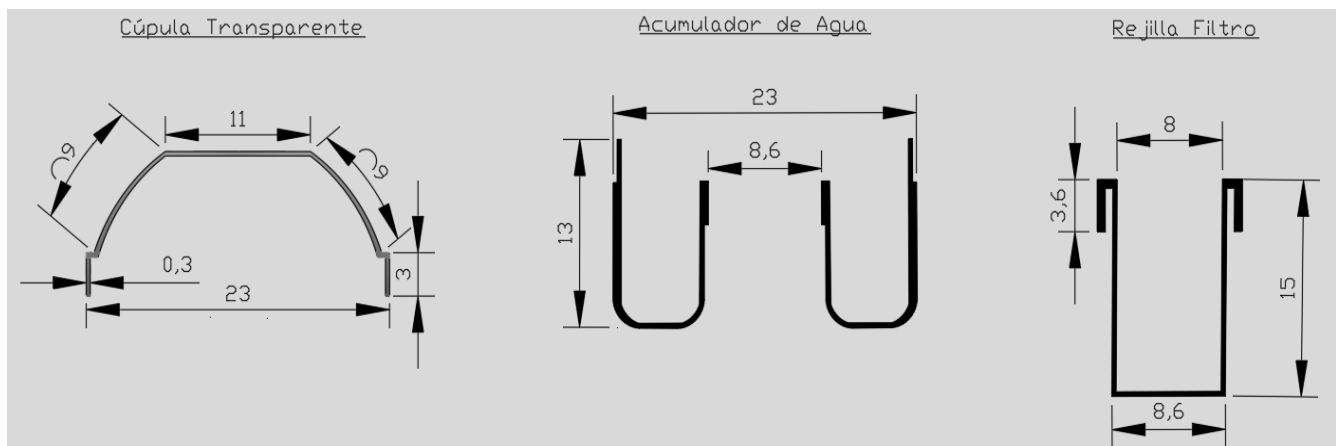


Imagen N°8: Esquema evaporador solar (cm)

Fuente: Elaboración propia programa AutoCAD

#### 4.2 Materiales

El material seleccionado para la construcción del evaporador solar es el PLA (ácido poliláctico), un polímero termoplástico biodegradable derivado de recursos renovables como el almidón de maíz o la caña de azúcar.

El PLA presenta una buena resistencia mecánica y rigidez, características esenciales para garantizar la durabilidad del evaporador bajo diferentes condiciones de uso. Además, el PLA ofrece una amplia gama de colores disponibles en el mercado, lo que permite fabricar el evaporador solar en el color deseado.

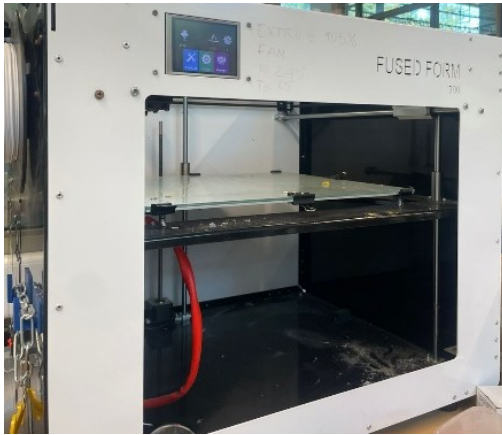
#### 4.3 Construcción Evaporador

La construcción del evaporador solar se realiza mediante una impresora 3D de última generación, ubicada en la Unidad de Innovación de la Universidad Católica de la Santísima Concepción (UCSC). Para su diseño, se utilizó el software AutoCAD para la creación de los planos y Autodesk Fusion para la modelación 3D, permitiendo un diseño optimizado y detallado del prototipo. La impresión 3D se realiza capa por capa, lo que permite una gran precisión en la fabricación del evaporador. El tipo de mallado utilizado es un mallado estructural, diseñado para equilibrar la resistencia y el peso del prototipo, con una densidad de mallado al 100 % adaptada a las especificaciones del diseño para garantizar la solidez del modelo y la durabilidad del evaporador.

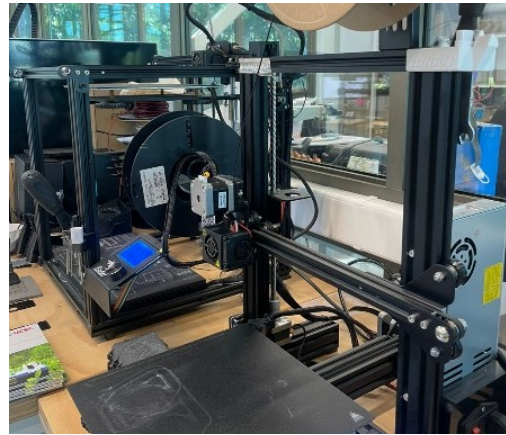


*Imagen N°9: Diseño Evaporador solar*

*Fuente: Elaboración propia programa Autodesk Fusion*



*Imagen N°10: Impresoras 3D, acumulador.  
Fuente: Elaboración propia*



*Imagen N°11: Impresoras 3D, Rejilla Filtro.  
Fuente: Elaboración propia*



*Imagen N°12: Evaporador solar terminado*

*Fuente: Elaboración propia*

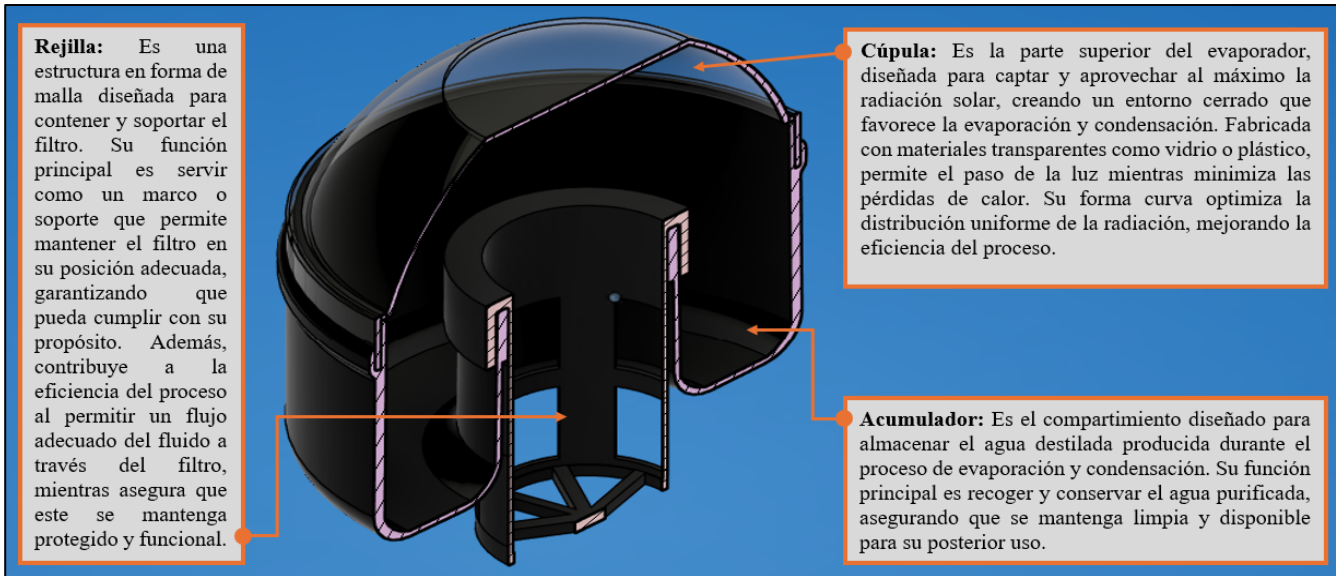


Imagen N°13: Descripción evaporador solar

Fuente: Elaboración propia

### 4.3.1 Proceso de destilación

1. Calentamiento: El agua (o solución) se calienta en un evaporador, lo que hace que el agua pase de estado líquido a gaseoso (vapor).
2. Evaporación: El vapor asciende y se desplaza hacia un condensador.
3. Condensación: En el condensador, el vapor se enfría al entrar en contacto con un material frío (como agua a temperatura ambiente), lo que provoca que el vapor se condense y vuelva a convertirse en líquido.
4. Recolección: El agua condensada se recoge en un recipiente, separando las impurezas que quedaron en el evaporador.

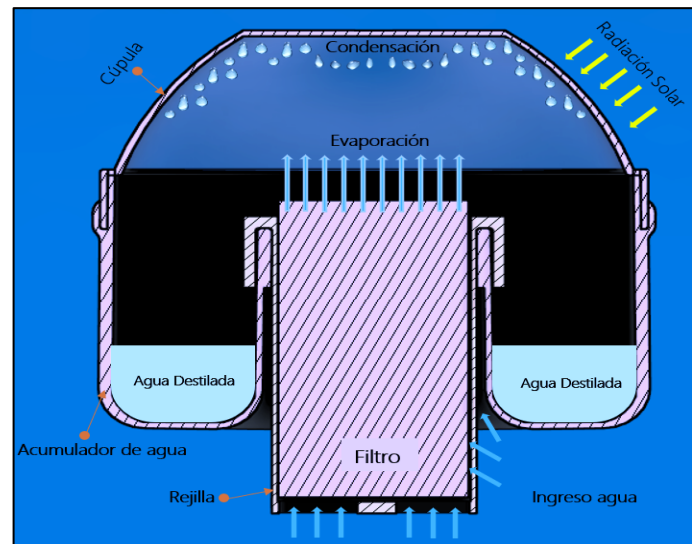


Imagen N°14: Proceso de destilación

Fuente: Elaboración propia

### 4.3.2 Selección de filtro

La selección del filtro para la purificación del agua en un sistema de evaporación solar debe considerar factores como el tipo de contaminantes presentes en el agua, el tamaño de poro adecuado para eliminar partículas o microorganismos, y el material del filtro, que puede ser de carbón activado, cerámica, o malla, dependiendo de las necesidades específicas. Además, es importante evaluar la fluidez del agua, la durabilidad del filtro, su facilidad de mantenimiento, y el costo, buscando un equilibrio entre eficiencia y sostenibilidad.

### 4.3.3 Equipo utilizado



Imagen N°15: Sensor Temperatura  
 Fuente: Elaboración propia



Imagen N°16: Cámara de simulación  
 Fuente: Elaboración propia



Imagen N°17: Termómetro, V. precipitado  
 Fuente: TP laboratorio químico

## 4.4 Ensayos realizados

Los ensayos permitirán identificar oportunidades de mejora en el diseño, con el fin de optimizar la eficiencia del sistema. Durante los ensayos, se medirán varios parámetros clave que son esenciales para evaluar el rendimiento del evaporador solar. Estos parámetros incluyen:

- Cantidad de agua destilada diariamente (Vd)
- Irradiación solar (RAD)
- Temperatura del agua (Ta)
- Temperatura ambiental

### 4.4.1 Ensayos en laboratorio

En esta fase, se realizarán pruebas bajo condiciones controladas en el laboratorio de Procesos Químicos Aplicados de la Universidad Católica de la Santísima Concepción, utilizando un sistema de irradiación artificial que mantendrá condiciones uniformes y permitirá minimizar la influencia de factores climáticos (Imagen N°16). Se empleó una campana industrial LED, con una potencia nominal de 150 W, como la fuente principal de radiación simulada. Este dispositivo fue utilizado para replicar las condiciones de radiación solar en un entorno controlado, proporcionando un flujo constante de energía hacia el sistema ver Anexo A (Ítem A.2 Especificaciones lámpara LED). En total, se llevarán a cabo 10 ensayos en este entorno controlado para obtener resultados precisos sobre el comportamiento del sistema. Los primeros 5 ensayos se realizarán sin masa, lo que permitirá observar el comportamiento del sistema en condiciones ideales, sin interferencia de la masa. Posteriormente, se realizarán 5 ensayos adicionales con una masa de 1.592 kg, con el objetivo de evaluar cómo la presencia de este peso puede variar la eficiencia del sistema.

### 4.4.2 Pruebas al aire libre

Estas pruebas se realizarán en la comuna de Florida, donde el sistema estará expuesto a irradiación solar natural y a condiciones ambientales variables. Este tipo de ensayo permitirá evaluar el desempeño del sistema en condiciones reales, simulando su funcionamiento en un entorno cercano a su aplicación práctica. Durante estos ensayos, se medirán variables que solo pueden ser observadas en un entorno real, lo que proporcionará datos valiosos sobre la eficacia del prototipo en diversas condiciones ambientales. Se llevarán a cabo 10 ensayos al aire libre, empleando datos de radiación solar recopilados por una estación cercana al lugar. La información utilizada fue obtenida de la estación Santa Lucía, ubicada en Florida, perteneciente a la red agropecuaria del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA). Esta estación proporciona datos actualizados sobre radiación solar en intervalos horarios, lo que permitió obtener un registro representativo. Para visualizar la radiación por horario y por ensayo, ver Anexo A (Ítem A.3). Posteriormente, se realizarán 5 ensayos adicionales con una masa de 1.592 kg, con el objetivo de evaluar cómo la presencia de este peso puede variar la eficiencia del sistema.

#### 4.4.3 Pruebas comparativas

En este estudio, se evaluarán y compararán el prototipo propuesto con otros prototipos de evaporadores solares, con el objetivo de determinar cuál ofrece los mejores resultados en términos de eficiencia y efectividad en la destilación del agua. Se contrastará el rendimiento del prototipo en estudio con un evaporador solar tipo vertiente (tipo caseta) con pendiente variable, basado en el diseño propuesto por Colmenares Angarita y Pinzón Rangel (2017) en su investigación "Diseño, Construcción y Pruebas de un Destilador Solar" (Universidad Pontificia Bolivariana, Escuela de Ingeniería y Administración). A diferencia del evaporador convencional, que utiliza una estructura fija que depende de la radiación solar directa, el evaporador tipo caseta con pendiente variable tiene la capacidad de ajustarse para maximizar la captación solar durante todo el día, incrementando así su eficiencia. El propósito de este estudio es evaluar las diferencias en el rendimiento térmico y la producción de agua destilada entre ambos sistemas, con el fin de identificar los beneficios de una estructura con pendiente ajustable y optimizar el aprovechamiento de la energía solar.

#### 4.5 Ecuaciones Utilizadas

##### 4.5.1 Irradiancia

La irradiancia es la potencia radiante que incide sobre una unidad de área ( $W/m^2$ ). Es un parámetro crucial para determinar la eficiencia del sistema.

$$E = P/A \quad (5) \quad \text{Donde } E \text{ es la irradiancia } (W/m^2), P \text{ es la potencia radiante } (W) \text{ y } A \text{ es el área sobre la que incide la radiación } (m^2).$$

##### 4.5.2 Flotabilidad del evaporador

La flotabilidad es la capacidad de un cuerpo para sostenerse dentro de un fluido. Esta flota cuando la fuerza resultante de la presión ejercida en la parte inferior del cuerpo es superior a la fuerza resultante de su peso más la presión ejercida en la parte superior. La fórmula de la fuerza boyante o de flotación ( $F_B$ ):

$$F_B = \rho * g * V \quad (6) \quad \text{Donde } \rho \text{ densidad del fluido en } Kg/m^3, g \text{ aceleración de gravedad en } m/s^2 \text{ y } V \text{ volumen objeto en } m^3.$$

##### 4.5.3 Flujo másico del agua destilada ( $m_d$ )

Para el cálculo del flujo másico del agua destilada se toma como tiempo efectivo diario de irradiación solar. Se obtiene de la siguiente manera:

$$m_d = \frac{(V_d) * (\rho_{agua})}{t} \quad (7) \quad \text{Donde } V_d \text{ volumen de agua destilada } (m^3), \rho_{agua} \text{ densidad del agua } (Kg/m^3) \text{ y } t \text{ tiempo efectivo.}$$

##### 4.5.4 Calor entregado por la fuente

El calor entregado por la fuente caliente se define como el producto entre la radiación durante el día y el área del evaporador, así tenemos:

$$Q_{cal} = H * A \quad (8) \quad \text{Donde } H \text{ radiación que incide durante un período de tiempo sobre una superficie determinada } (W/m^2) \text{ y } A \text{ área del evaporador } (m^2).$$

Para  $H$ , es necesaria la radiación solar acumulada diaria  $H$ , esta se obtiene al graficar los puntos de radiación solar incidente Vs hora y calcular el área bajo la curva en cada caso.

#### 4.5.5 Calor latente de vaporización del agua $h_{fg}$

Este parámetro se obtiene de las tablas de vapor y se halla para cada día a la temperatura promedio del agua.  $T_a$  promedio, a una presión de saturación. En tablas de vapor - agua saturada - temperatura-Entalpía.

#### 4.5.6 Eficiencia del evaporador

La eficiencia del evaporador se calcula para cada día en el que se realizaron las pruebas, considerando los datos de evaporación y las condiciones específicas de cada jornada. Este cálculo permite evaluar la eficiencia del sistema en función de la cantidad de agua destilada producida en relación con la energía solar captada durante el día.

La eficiencia del evaporador ( $\eta$ ) se define como el producto entre la cantidad y su calor latente de vaporización dividido entre la irradiación, su ecuación:

$$\eta = (m_d * h_{fg}) / Q_{cal} \quad (9)$$

Donde  $m_d$  es el flujo masico de volumen destilado (Kg/s),  $h_{fg}$  calor latente de vaporización del agua (KJ/Kg) y  $Q_{cal}$  calor entregado por la fuente (KJ/s).

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Los resultados obtenidos permiten identificar oportunidades de mejora en el diseño y los materiales utilizados, con el fin de optimizar la eficiencia.

### 5.1 CÁLCULO FLOTABILIDAD DEL EVAPORADOR

Tabla N°1: Características del Evaporador Solar

	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Material	Masa (Kg)	Volumen (m <sup>3</sup> )
<b>Acumulador Agua</b>	23	13	PLA	0.848	0.000891
<b>Cúpula</b>	23	10	PLA	0.204	0.000172
<b>Rejilla</b>	8	15	Plástico transparente	0.190	0.000200

Fuente: Elaboración propia

La Tabla N°1 detalla las características del evaporador solar, acumulador de PLA robusto y de alta capacidad (23 cm de diámetro, 13 cm de altura, 0.848 kg), una cúpula de PLA (23 cm de diámetro, 10 cm de altura, 0.204 kg) para captar calor solar y una rejilla transparente (8 cm de diámetro, 15 cm de altura) que mejora la transferencia de energía.

Tabla N°2: Resultados Flotabilidad del Evaporador Solar

	Densidad fluido (kg/m <sup>3</sup> )	Masa (kg)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Gravedad (m/s <sup>2</sup> )	Peso (N)	Fuerza boyante (N)	FB > W
<b>Agua</b>	997					12.350	<b>Cumple</b>
<b>Relave</b>	1900	1.243	0.00126	9.81	12.191	23.536	<b>Cumple</b>

Fuente: Elaboración propia

Los resultados (Tabla N°2) muestran que el evaporador solar mantiene su estabilidad dentro de los rangos esperados de flotación, incluso con variaciones en la densidad del fluido. A pesar de los cambios en la densidad del agua, el sistema demuestra adaptabilidad para operar en diversas fuentes de agua.

Tabla N°3: Datos obtenidos en los ensayos en Laboratorio

N°	Día Ensayo		Hora inicio	Hora Fin	Vd (ml)	Temp. Agua Inicial Fuera Evap. (C°)	Temp. Agua Inicial Final Evap. (C°)	Temp. Agua Final dentro Evap. (C°)	Radiación (W/m2)
1	21 Nov	22 Nov	12:45	12:45	15	20.5	34.4	34.6	
2	25 Nov	26 Nov	10:30	10:30	20	21.8	36.3	35.0	
3	26 Nov	27 Nov	11:15	11:15	18	31.0	35.0	35.1	3610.3
4	27 Nov	28 Nov	11:45	11:45	22	30.0	35.0	33.3	
5	02 Dic	03 Dic	9:00	9:00	18	20.0	34.0	31.0	
6	03 Dic	04 Dic	9:30	9:30	23	25.0	34.0	30.1	
7	05 Dic	06 Dic	12:10	12:10	25	21.0	34.1	30.0	
8	09 Dic	10 Dic	9:45	9:45	28	21.1	34.0	32.1	3610.3
9	10 Dic	11 Dic	10:00	10:00	28	32.1	35.1	33.1	
10	11 Dic	12 Dic	10:25	10:25	28	34.2	34.5	32.0	

Fuente: Elaboración propia

Los ensayos en laboratorio (Tabla N°3) muestran temperaturas dentro del evaporador entre 30°C y 35°C, lo que indica una buena absorción de calor, y un volumen de agua destilada que varía entre 15 ml y 28 ml, con radiación solar constante de 3610.3 W/m<sup>2</sup> en algunos casos, lo que favorece la eficiencia.

Tabla N°4: Datos obtenidos en los ensayos Aire Libre

N°	Día Ensayo		Hora inicio	Hora Fin	Vd (ml)	Temp. Agua Inicial Fuera Evap. (C°)	Temp. Agua Inicial Final Evap. (C°)	Temp. Agua Final dentro Evap. (C°)
1	29 Nov				28	15.9	33.1	31.9
2	30 Nov				14	15.7	32.5	30.2
3	01 Dic		8:00	20:00	12	15.0	30.9	29.2
4	07 Dic				14	16.2	31.7	29.9
5	08 Dic				28	16.0	29.1	28.7
6	12 Dic	13 Dic	18:10	18:10	30	25.8	29.1	27.0
7	13 Dic	14 Dic	18:50	18:50	30	28.3	32.4	30.3
8	14 Dic	15 Dic	19:10	19:10	27	30.8	28.9	28.0
9	15 Dic	16 Dic	19:30	19:30	20	27.7	23.4	22.1
10	16 Dic	17 Dic	19:50	19:50	20	22.3	27.6	26.8

Fuente: Elaboración propia

Los ensayos al aire libre (Tabla N°4), las temperaturas dentro del evaporador son más bajas, variando entre 22°C y 33°C, lo que puede deberse a la mayor dispersión del calor en el entorno. Además, el volumen de agua destilada es más variable, entre 12 ml y 30 ml, y el rendimiento está sujeto a las condiciones climáticas, como la radiación solar y la temperatura ambiental.

## 5.2 CÁLCULO EFICIENCIA DEL EVAPORADOR

### 5.2.1 Calculo del flujo másico del agua destilada ( $m_d$ )

Tabla N°5: Flujo másico de agua destilada,  $m_d$  Laboratorio

N°	Día Ensayo		Hora inicio	Hora Fin	Tiempo (s)	Vd (m <sup>3</sup> )	$\rho$ agua (kg/m <sup>3</sup> )	md (kg/s)
1	21 Nov	22 Nov	12:45	12:45		1.50E-05		1.73E-07
2	25 Nov	26 Nov	10:30	10:30		2.00E-05		2.31E-07
3	26 Nov	27 Nov	11:15	11:15	86400	1.80E-05	997	2.08E-07
4	27 Nov	28 Nov	11:45	11:45		2.20E-05		2.54E-07
5	02 Dic.	03 Dic	9:00	9:00		1.80E-05		2.08E-07
6	03 Dic	04 Dic	9:30	9:30		2.30E-05		2.65E-07
7	05 Dic	06 Dic	12:10	12:10		2.50E-05		2.88E-07
8	09 Dic	10 Dic	9:45	9:45	86400	2.80E-05	997	3.23E-07
9	10 Dic	11 Dic	10:00	10:00		2.80E-05		3.23E-07
10	11 Dic	12 Dic	10:25	10:25		2.80E-05		3.23E-07

Fuente: Elaboración propia

La Tabla N°5 presenta el flujo másico de agua destilada obtenido en los ensayo de laboratorio. El tiempo de operación constante 24 horas permitió evaluar la capacidad del sistema. Los resultados muestran que el flujo másico de agua destilada ( $m_d$ ) varía entre 1.73E-07 kg/s y 3.23E-07 kg/s, con incrementos asociados al aumento del volumen destilado ( $V_d$ ) en cada ensayo.

A partir del ensayo 5, se añadió una masa de 1.592 kg al sistema, lo cual se refleja en la mejora del flujo másico. El valor más alto de flujo másico 3.23E-07 kg/s se alcanzó en los ensayos de los días 9-10, 10-11 y 11-12 de diciembre, con un volumen destilado de 2.80E-05 m<sup>3</sup>. Esto indica una mayor eficiencia del sistema en esos días, posiblemente debido el efecto positivo de la masa adicional.

Tabla N°6: Flujo másico de agua destilada,  $m_d$  Aire Libre

N°	Día Ensayo		Hora inicio	Hora Fin	Tiempo (s)	Vd (m <sup>3</sup> )	$\rho$ agua (kg/m <sup>3</sup> )	md (kg/s)
1	29 Nov					2.80E-05		6.46E-07
2	30 Nov					1.40E-05		3.23E-07
3	01 Dic		8:00	20:00	43200	1.20E-05	997	2.77E-07
4	07 Dic					1.40E-05		3.23E-07
5	08 Dic					2.80E-05		6.46E-07
6	12 Dic	13 Dic	18:10	18:10		3.00E-05		3.46E-07
7	13 Dic	14 Dic	18:50	18:50		3.00E-05		3.46E-07
8	14 Dic	15 Dic	19:10	19:10	86400	2.70E-05	997	3.12E-07
9	15 Dic	16 Dic	19:30	19:30		2.00E-05		2.31E-07
10	16 Dic	17 Dic	19:50	19:50		2.00E-05		2.31E-07

Fuente: Elaboración propia

La Tabla N°6 presenta el flujo másico de agua destilada obtenido en los ensayos al aire libre. En los primeros cinco ensayos, el tiempo de operación fue de 8 horas diarias, coincidiendo con las horas de mayor radiación solar. Los cinco ensayos restantes se realizaron con un tiempo de operación de 24 horas, incorporando además una masa adicional de 1.592 kg, lo que permitió evaluar tanto la capacidad del sistema en un ambiente variable, como el efecto del peso extra sobre su rendimiento.

En los ensayos iniciales, el flujo másico ( $m_d$ ) osciló entre  $2.77E-07$  kg/s y  $6.46E-07$  kg/s, siendo el mayor valor asociado a un volumen destilado ( $V_d$ ) de  $2.80E-05$  m<sup>3</sup>. Estos resultados reflejan el desempeño del sistema bajo condiciones variables. Por otro lado, los ensayos realizados con masa extra mostraron una ligera mejora en el flujo másico, alcanzando hasta  $3.46E-07$  kg/s para un volumen destilado de  $3.00E-05$  m<sup>3</sup>. Este incremento sugiere que la masa adicional ayudó a estabilizar el sistema y mejorar la transferencia de energía.

## 5.2.2 Cálculo del calor entregado por la fuente

Tabla N°7: Calor entregado por la fuente,  $Q_{cal}$  Laboratorio

Área (m)	H (W/m <sup>2</sup> )	Q (kJ/s)
0.042	150.430	0.00625

Fuente: Elaboración propia

La Tabla N°7 presenta los datos sobre el calor entregado por la fuente de energía utilizada durante los ensayos en laboratorio. En este caso, se empleó una campana industrial LED, con una potencia nominal de 150 W, como la fuente principal de radiación simulada. Este dispositivo fue utilizado para replicar las condiciones de radiación solar en un entorno controlado, proporcionando un flujo constante de energía hacia el sistema.

El área irradiada fue de 0.042 m<sup>2</sup>, y la intensidad de radiación (H) medida fue de 150.430 W/m<sup>2</sup>. Esto resultó en un calor transferido (Q) al sistema de 0.00625 kJ/s. Este valor es significativo para determinar la cantidad de energía disponible para el proceso de evaporación y destilación del agua.

La elección de esta fuente LED como reemplazo del sol asegura una distribución uniforme de la radiación en el sistema, lo que contribuye a una evaluación precisa del rendimiento del evaporador solar bajo condiciones controladas. Sin embargo, dado que la intensidad de radiación simulada es fija, los valores de calor entregado pueden diferir de los obtenidos bajo condiciones reales de luz solar, que son dinámicas y dependen de factores climáticos.

Tabla N°8: Calor entregado por la fuente,  $Q_{cal}$  Aire Libre

N°	Día Ensayo		H (Wh/m <sup>2</sup> )	H (W/m <sup>2</sup> )	A(m <sup>2</sup> )	Q (kJ/s)
1	29 Nov		7831.4	652.6		0.027115
2	30 Nov		7759.0	646.6		0.026864
3	01 Dic		4223.5	352.0	0.042	0.014623
4	07 Dic		7749.7	645.8		0.026832
5	08 Dic		7559.9	630.0		0.026175
6	12 Dic	13 Dic	8525.7	355.2		0.014759
7	13 Dic	14 Dic	8722.0	363.4		0.015099
8	14 Dic	15 Dic	8543.1	356.0	0.042	0.014789
9	15 Dic	16 Dic	7798.8	324.9		0.013501
10	16 Dic	17 Dic	7154.6	298.1		0.012386

Fuente: Elaboración propia

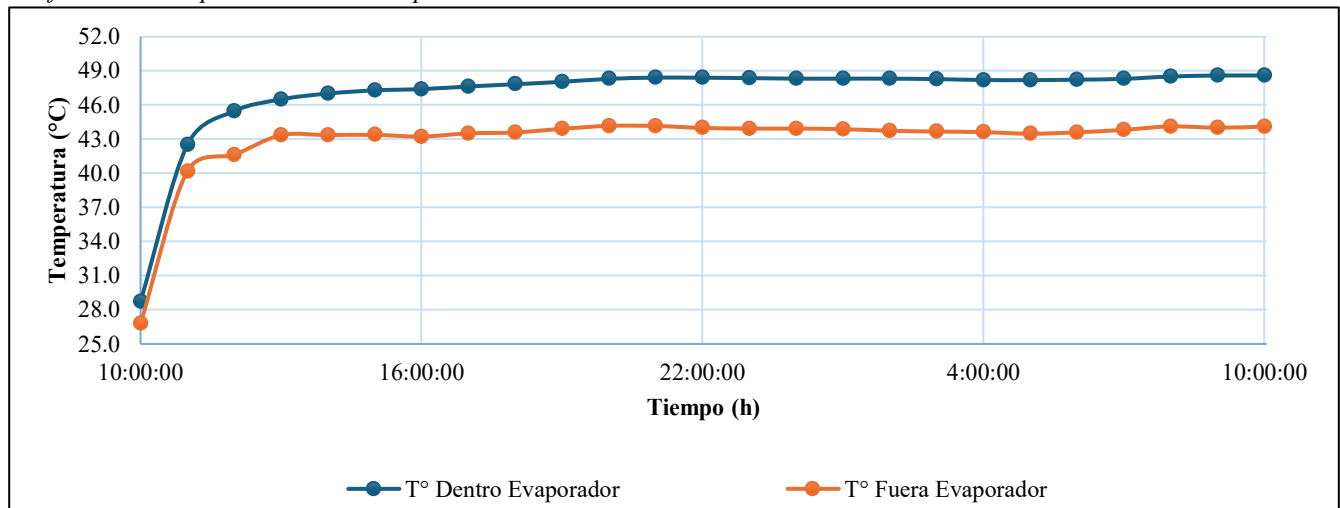
La tabla N°8 presenta información sobre el calor entregado por la fuente utilizada durante los ensayos al aire libre. Se emplearon datos de radiación solar recopilados por una estación cercana al lugar, la información utilizada fue obtenida de la estación Santa Lucía, ubicada en Florida, perteneciente a la red agropecuaria del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA). Esta estación proporciona datos actualizados sobre radiación solar en intervalos horarios, lo que permitió obtener un registro representativo. Para visualizar la radiación por horario y por ensayo ver de Anexo A (Ítem A.3).

### 5.2.3 Cálculo calor latente de vaporización del agua $h_{fg}$

#### 5.2.3.1 Evaluación de la temperatura ambiental

La temperatura ambiental influye en el desempeño del evaporador solar al afectar la energía térmica disponible para la evaporación del agua. En este estudio, se registraron las temperaturas tanto en los ensayos de laboratorio, donde se mantuvo una temperatura constante, como en los realizados al aire libre, sujetos a fluctuaciones naturales. Estas variaciones impactaron la eficiencia del sistema. Los datos de temperatura fueron obtenidos mediante dispositivos Temperature Loggers, que se detallan en el Anexo A (Ítems A.4 y A.5) y en el archivo Pdf AnexoN°2\_TemperatureLogger.

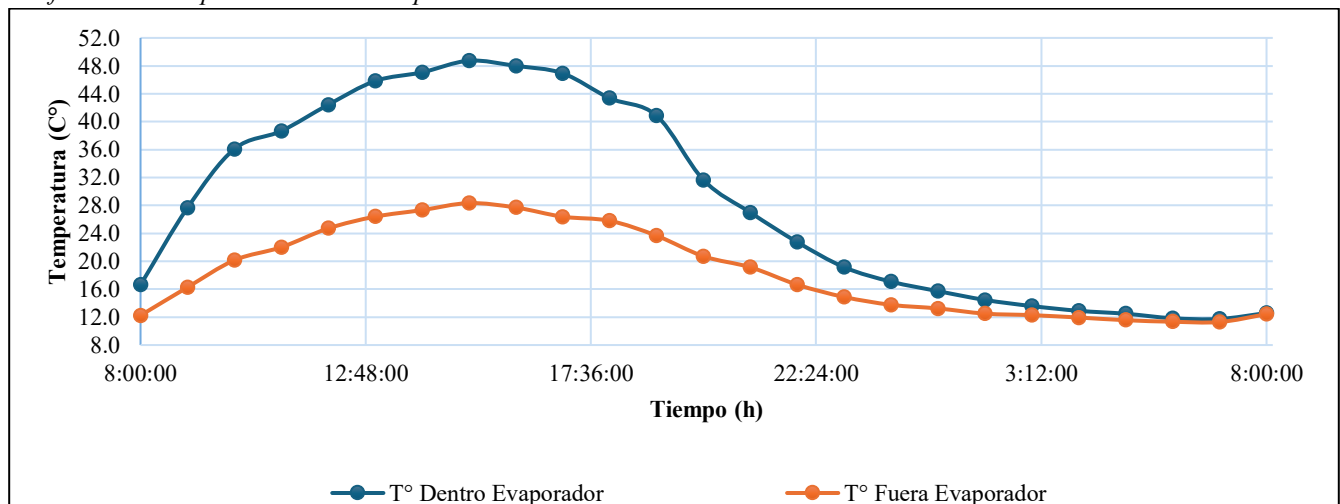
Gráfico N°1: Temperatura ambiental promedio en laboratorio



Fuente: Elaboración propia

El Gráfico N°1 proporciona una representación las diferencias térmicas. A medida que avanzaba el ciclo, la temperatura dentro del evaporador mostró un incremento constante, alcanzando su punto máximo de 48.6°C a las 24 horas. Este comportamiento confirma la capacidad del sistema para acumular calor de manera eficiente durante el día, lo que resalta la influencia de la campana LED y su contribución al aumento de la temperatura interna.

Gráfico N°2: Temperatura ambiental promedio al aire libre



Fuente: Elaboración propia

El Gráfico N°2 ilustra de manera clara estas variaciones, destacando la diferencia entre las temperaturas internas del evaporador, que tienden a mantenerse más constantes y altas durante el día, y las externas, que fluctúan de forma más significativa debido a las condiciones climáticas variables.

Tabla N°9: Calor latente de vaporización del agua,  $h_{fg}$  Laboratorio

N°	Día Ensayo		Temperatura Agua				$h_{fg}$ (kJ/kg)
			Inicial Fuera Evap. (C°)	Final Fuera Evap. (C°)	Final Dentro Evap. (C°)	Ta Prom. (C°)	
1	21 Nov	22 Nov	20.5	34.4	34.6	29.8	2430.2
2	25 Nov	26 Nov	21.8	36.3	35.0	31.0	2427.3
3	26 Nov	27 Nov	31.0	35.0	35.1	33.7	2421.0
4	27 Nov	28 Nov	30.0	35.0	33.3	32.8	2423.2
5	02 Dic	03 Dic	20.0	34.0	31.0	28.3	2433.8
6	03 Dic	04 Dic	25.0	34.0	30.1	29.7	2430.5
7	05 Dic	06 Dic	21.0	34.1	30.0	28.4	2433.7
8	09 Dic	10 Dic	21.1	34.0	32.1	29.1	2432.0
9	10 Dic	11 Dic	32.1	35.1	33.1	33.4	2421.6
10	11 Dic	12 Dic	34.2	34.5	32.0	33.6	2421.3

Fuente: Elaboración propia

La Tabla N°9 muestra los datos del calor latente de vaporización del agua ( $h_{fg}$ ) obtenidos durante los ensayos de laboratorio. Se registraron las temperaturas iniciales y finales, tanto fuera como dentro del evaporador, para calcular la temperatura promedio ( $T_a$  Prom.) del sistema en cada ensayo. Los valores de  $h_{fg}$  variaron entre 2421.0 kJ/kg y 2433.8 kJ/kg, dependiendo de las condiciones de temperatura.

Los valores más altos de  $h_{fg}$  se registraron en ensayos con temperaturas promedio más bajas, mientras que los más bajos correspondieron a temperaturas promedio más altas. Este comportamiento está en línea con las propiedades termodinámicas del agua, que indican una disminución del calor latente a medida que aumenta la temperatura.

Tabla N°10: Calor latente de vaporización del agua,  $h_{fg}$  Aire Libre

N°	Día Ensayo		Temperatura Agua				$h_{fg}$ (kJ/kg)
			Inicial Fuera Evap. (C°)	Final Fuera Evap. (C°)	Final Dentro Evap. (C°)	Ta Prom. (C°)	
1	29 Nov		15.9	33.1	31.9	27.0	2437.0
2	30 Nov		15.7	32.5	30.2	26.1	2439.0
3	01 Dic		15.0	30.9	29.2	25.0	2441.6
4	07 Dic		16.2	31.7	29.9	25.9	2439.5
5	08 Dic		16.0	29.1	28.7	24.6	2442.7
6	12 Dic	13 Dic	25.8	29.1	27.0	27.3	2436.2
7	13 Dic	14 Dic	28.3	32.4	30.3	30.3	2429.0
8	14 Dic	15 Dic	30.8	28.9	28.0	29.2	2431.6
9	15 Dic	16 Dic	27.7	23.4	22.1	24.4	2443.1
10	16 Dic	17 Dic	22.3	27.6	26.8	25.6	2440.4

Fuente: Elaboración propia

La Tabla N°10 muestra los valores de temperatura registrados durante los ensayos realizados al aire libre, utilizados para calcular el calor latente de vaporización del agua ( $h_{fg}$ ) bajo condiciones reales de operación. Se registraron las temperaturas iniciales y finales del agua fuera y dentro del evaporador, y se determinó una temperatura promedio ( $T_a$  Prom.) representativa para cada ensayo.

El calor latente de vaporización del agua ( $h_{fg}$ ) varió entre 2429.0 kJ/kg y 2443.1 kJ/kg, mostrando una tendencia inversamente proporcional a la temperatura promedio. Los valores más altos de  $h_{fg}$  se asociaron con temperaturas promedio más bajas, como en el ensayo del 15-16 de diciembre de 24.4 °C, 2443.1 kJ/kg. Por el contrario, los valores más bajos de  $h_{fg}$  se relacionaron con temperaturas promedio más altas, como en el ensayo del 13-14 de diciembre de 30.3 °C, 2429.0 kJ/kg.

### 5.2.4 Eficiencia del evaporador solar ( $\eta$ )

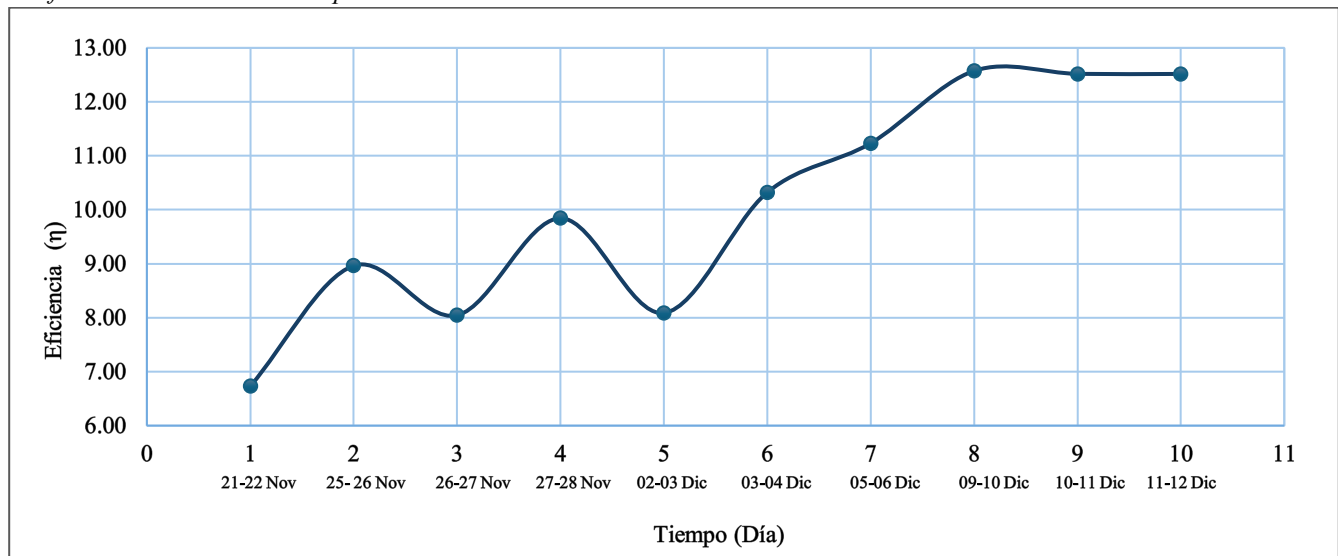
Tabla N°11: Eficiencia del evaporador solar para cada día Laboratorio

N°	Día Ensayo		md (kg/s)	Q cal (kJ/s)	hfg (kJ/kg)	$\eta$ (%)
1	21 Nov	22 Nov	1.73E-07		2430.2	6.73
2	25 Nov	26 Nov	2.31E-07		2427.3	8.96
3	26 Nov	27 Nov	2.08E-07	0.006	2421.0	8.05
4	27 Nov	28 Nov	2.54E-07		2423.2	9.84
5	02 Dic	03 Dic	2.08E-07		2433.8	8.09
6	03 Dic	04 Dic	2.65E-07		2430.5	10.32
7	05 Dic	06 Dic	2.88E-07		2433.7	11.23
8	09 Dic	10 Dic	3.23E-07	0.006	2432.0	12.57
9	10 Dic	11 Dic	3.23E-07		2421.6	12.52
10	11 Dic	12 Dic	3.23E-07		2421.3	12.52

Fuente: Elaboración propia

La Tabla N°11 presenta la eficiencia del evaporador solar durante los ensayos de laboratorio, calculada en función del flujo másico destilado ( $m_d$ ), el calor entregado al sistema ( $Q_{cal}$ ), y el calor latente de vaporización del agua ( $h_{fg}$ ). En los primeros ensayos del 21 al 28 de noviembre, la eficiencia osciló entre 6.73% y 9.84%, con valores moderados de flujo másico y calor entregado. Esto refleja el desempeño del sistema en condiciones iniciales de operación sin ajustes. A partir del 2 de diciembre, cuando se incorporó una masa adicional de 1.592 kg, la eficiencia mostró una mejora notable, alcanzando valores de hasta 12.57% entre 09-10 de diciembre.

Gráfico N°3: Rendimiento evaporador solar laboratorio



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico N°3 se observa que, en los primeros ensayos entre 21-28 de noviembre, la eficiencia del sistema fue baja, variando entre 6.73% y 9.84%, lo que refleja un rendimiento moderado en condiciones constantes. A partir del ensayo del 2 de diciembre, cuando se incorporó una masa extra de 1.592 kg, la eficiencia aumentó progresivamente, alcanzando su punto máximo en el ensayo del 9-10 de diciembre con 12.57%, lo que evidencia la influencia positiva de la estabilización térmica. En los últimos tres ensayos (10-12 de diciembre), la eficiencia se estabilizó en 12.52%, indicando que el sistema alcanzó un estado de operación más consistente y confiable.

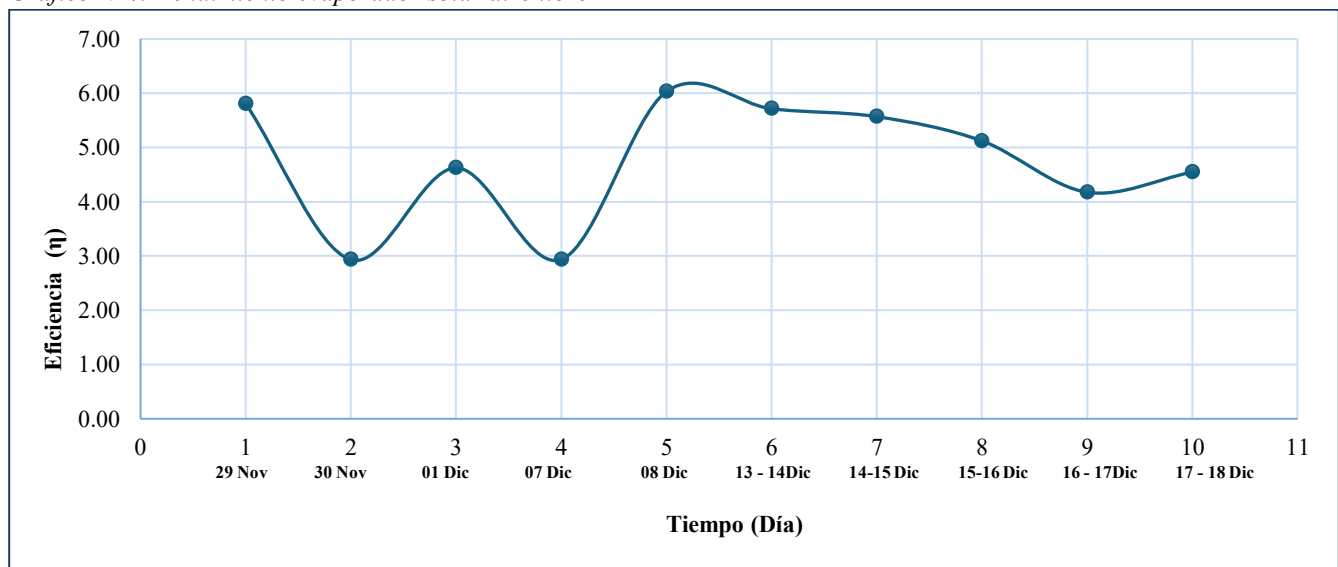
Tabla N°12: Eficiencia del evaporador solar para cada día Aire Libre

N°	Día ensayo		md (kg/s)	Qcal (kJ/s)	hfg (kJ/kg)	$\eta$ (%)
1	29 Nov		6.E-07	0.027115	2437.0	5.81
2	30 Nov		3.E-07	0.026864	2439.0	2.93
3	01 Dic		3.E-07	0.014623	2441.6	4.62
4	07 Dic		3.E-07	0.026832	2439.5	2.94
5	08 Dic		6.E-07	0.026175	2442.7	6.03
6	12 Dic	13 Dic	3.E-07	0.014759	2436.2	5.71
7	13 Dic	14 Dic	3.E-07	0.015099	2429.0	5.57
8	14 Dic	15 Dic	3.E-07	0.014789	2431.6	5.12
9	15 Dic	16 Dic	2.E-07	0.013501	2443.1	4.18
10	16 Dic	17 Dic	2.E-07	0.012386	2440.4	4.55

Fuente: Elaboración propia

La Tabla N°12 presenta la eficiencia del evaporador solar en condiciones al aire libre, mostrando variabilidad en el desempeño del sistema debido a factores climáticos. En los primeros ensayos, la eficiencia osciló entre 2.93% y 6.03%, reflejando el impacto de las condiciones ambientales y la radiación solar, que en algunos días fueron más favorables que en otros. A partir del 12 de diciembre, la eficiencia comenzó a disminuir progresivamente, alcanzando un valor mínimo de 4.18% en el ensayo del 15-16 de diciembre, lo que indica que las condiciones cambiantes afectaron negativamente el rendimiento del sistema. A lo largo de los últimos ensayos, la eficiencia se estabilizó en un rango de 4.18% a 5.81%, lo que sugiere que el sistema operó de manera constante, pero con un rendimiento general bajo debido a las fluctuaciones en las condiciones de la zona.

Gráfico N°4: Rendimiento evaporador solar aire libre



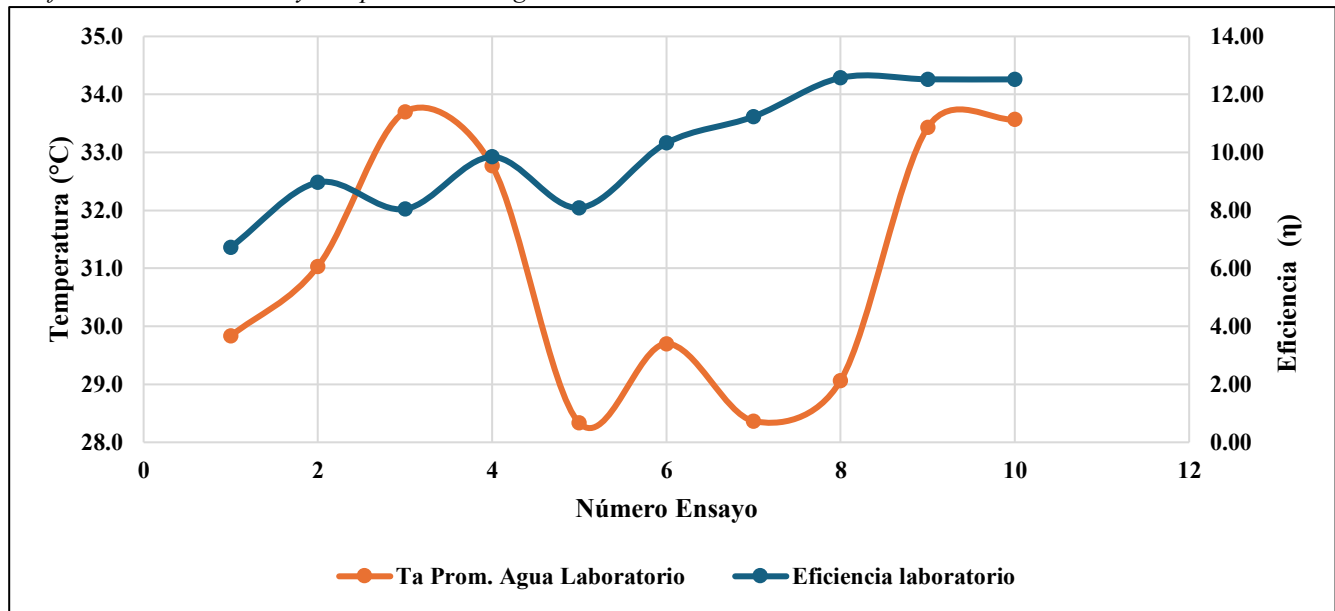
Fuente: Elaboración propia

En el gráfico N°4 se observa una clara variabilidad en la eficiencia del evaporador solar al aire libre. Inicialmente, la eficiencia mostró elevaciones moderadas, alcanzando hasta 6.03% en los primeros ensayos, pero rápidamente disminuyó en los días posteriores, alcanzando su valor más bajo de 4.18%. Esta caída en la eficiencia refleja cómo las fluctuaciones en las condiciones climáticas, como la radiación solar y la temperatura ambiente, afectan el rendimiento del sistema. A pesar de esta disminución, los últimos ensayos muestran una estabilización de la eficiencia en un rango de 4.18% a 5.81%, lo que indica que el sistema alcanzó un equilibrio bajo, aunque no óptimo, en sus condiciones operativas al aire libre.

### 5.2.5 Rendimiento evaporador solar y temperatura del agua

En esta sección, se presenta \_\_\_\_\_

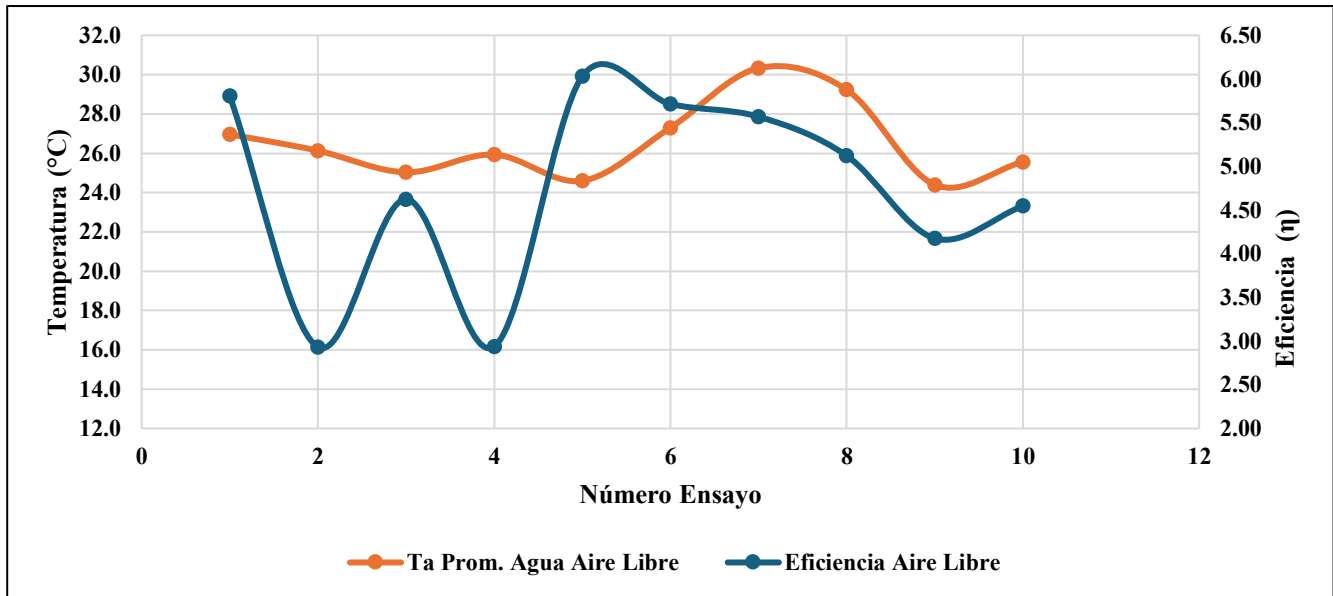
Gráfico N°5: Rendimiento y Temperatura del agua laboratorio



Fuente: Elaboración propia

El Gráfico N°5, muestra una clara relación entre la temperatura del agua y el rendimiento del evaporador solar. A medida que la temperatura del agua aumenta, se observa un incremento en el rendimiento, lo que indica que el sistema se vuelve más eficiente al alcanzar temperaturas más altas. Este comportamiento es coherente con las propiedades termodinámicas del agua.

Gráfico N°6: Rendimiento y Temperatura del agua al aire libre



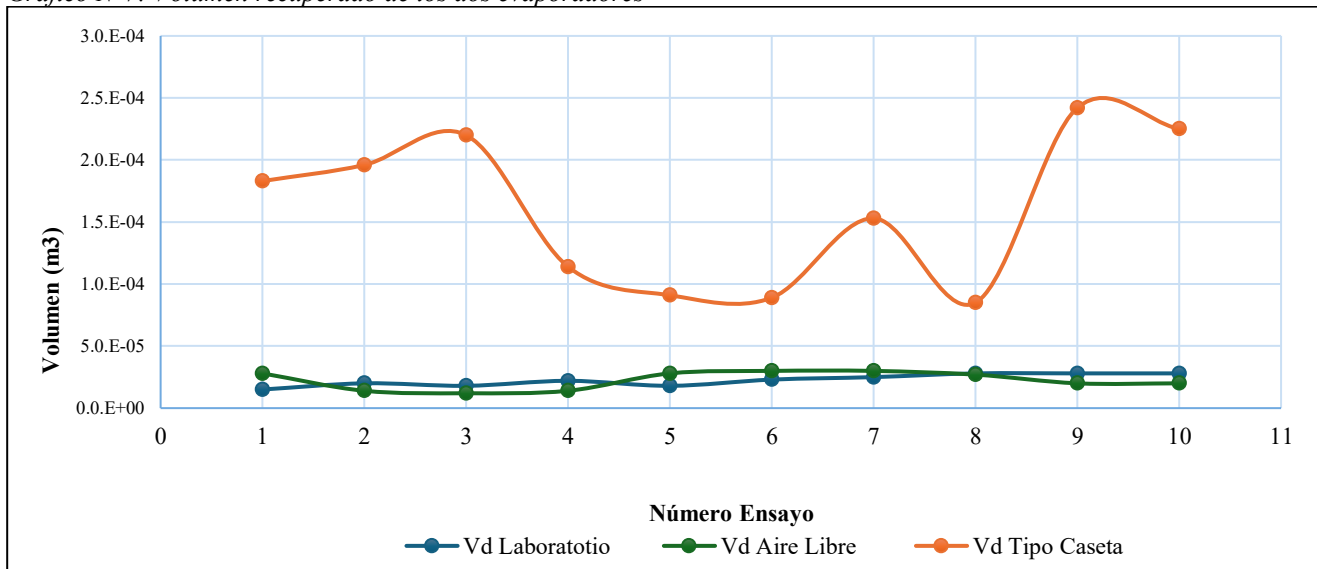
Fuente: Elaboración propia

El Gráfico N°6, muestra la relación entre la temperatura del agua y el rendimiento del evaporador solar bajo condiciones naturales. Al igual que en los ensayos de laboratorio, se observa una tendencia positiva en la que el rendimiento del sistema aumenta a medida que la temperatura del agua asciende. Este comportamiento refuerza la idea de que el aumento de la temperatura facilita el proceso de evaporación y, por lo tanto, mejora la eficiencia del sistema.

### 5.3 COMPARACIÓN EVAPORADORES SOLARES

#### 5.3.1 Comparación entre volúmenes recuperados y eficiencia

Gráfico N°7: Volumen recuperado de los dos evaporadores

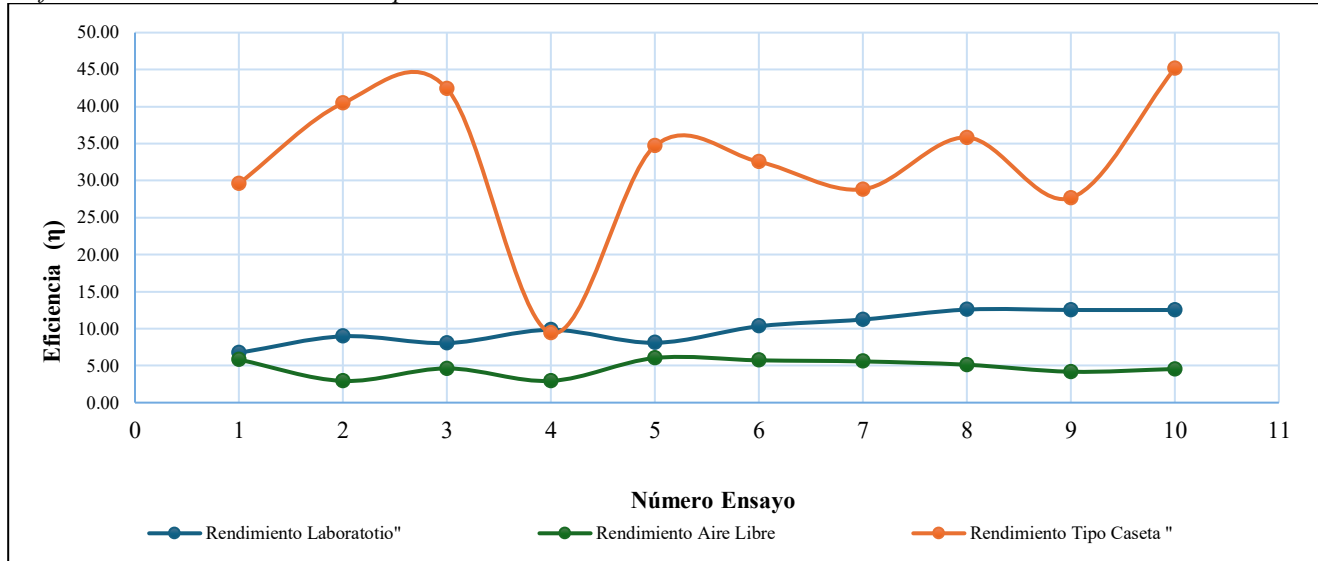


Fuente: Elaboración propia

El Gráfico N°7, muestra las diferencias en el volumen de agua destilada recuperados para los tres tipos de casos laboratorio, aire libre del evaporador estudiado y el tipo caseta (ítem 4.4.3). Los datos indican

que el evaporador tipo caseta supera significativamente en rendimiento a las otras dos configuraciones. Este diseño logra aprovechar mejor las condiciones térmicas y de captación solar, alcanzando volúmenes altos. En los ensayos, la configuración de laboratorio presentó volúmenes más consistentes pero menores, reflejando las condiciones controladas del entorno. Por otro lado, la configuración al aire libre evidenció mayor variabilidad en el rendimiento debido a factores ambientales como la radiación solar y el viento, el evaporador tipo caseta demostró ser más eficiente.

Gráfico N°8: Rendimiento de los evaporadores



Fuente: Elaboración propia

El Gráfico N°8 compara el rendimiento para los tres tipos de casos laboratorio, aire libre del evaporador estudiado y el tipo vertiente. Los datos revelan que el evaporador tipo caseta mostró consistentemente el mayor rendimiento en casi todos los ensayos, alcanzando eficiencias máximas de hasta 45.16%. Esto se debe a su diseño optimizado, que favorece una mayor captación y retención de energía solar.

En contraste, el evaporador en laboratorio presentó un rendimiento moderado, con eficiencias que oscilaron entre 6.73% y 12.57%, destacándose su estabilidad debido a las condiciones controladas. Por otro lado, el evaporador al aire libre mostró las eficiencias más bajas, con un rango de 2.93% a 6.03%, influenciado por factores externos como la variabilidad climática y la radiación solar directa.

Tabla N°13: Rango de eficiencia otros tipos de evaporadores y el estudiado

Tipo de destilador	Eficiencia (%)	Aplicación	Referencia
Chales Wilson	30-50	Pequeñas aplicaciones, bajo costo, baja radiación	Chales Wilson (1980)
Invernadero	50-70	Áreas con alta radiación, mayor eficiencia	Kaefer, A., et al. (2016)
Vertiente	60-80	Mayor captación solar, aplicación en zonas aisladas	Rajasekar, N., et al. (2017)
Dos vertientes	70-85	Grandes aplicaciones, alta eficiencia	Ibrahim, H. M., et al. (2018)
Cascada	75-80	Alta demanda de agua	Gupta, A., et al. (2019)
Esférico de barrera	80-95	Alta demanda de agua, máxima eficiencia solar	Dursun, B., et al. (2020)
Dona (Propuesto en este estudio)	10-20	Flotante, áreas relaves mineros	Elaboración propia

Fuente: Elaboración propia



La Tabla N°13 nos presenta el análisis comparativo de diferentes tipos de destiladores solares según su eficiencia y aplicaciones específicas. Los diseños tradicionales, como Chales Wilson (30-50%) y el invernadero (50-70%), son adecuados para pequeñas aplicaciones y zonas con alta radiación, respectivamente, mientras que los más avanzados, como el esférico de barrera (80-95%), destacan por su alta eficiencia y capacidad para satisfacer grandes demandas de agua. El destilador tipo "Dona", propuesto en este estudio, presenta una eficiencia inicial baja (10-20%) y está diseñado para flotar.

## 5.4 Oportunidades de Mejora

### 5.4.1 Ampliación del Dispositivo

Aumentar el tamaño del dispositivo puede tener un impacto positivo en la cantidad de agua que se puede procesar, lo que permite aumentar la producción de agua destilada. La ampliación debe ser cuidadosamente evaluada en términos eficiencia operativa, considerando el impacto de un mayor volumen en la transferencia de calor y la capacidad de captación solar. Un dispositivo de mayor tamaño también podría permitir la integración de otras mejoras, como el uso de múltiples filtros o la instalación de sistemas de bombeo para mejorar el flujo de agua.

### 5.4.2 Filtro

El sistema de filtrado podría optimizarse para mejorar la calidad del agua destilada. Se sugiere investigar otros tipos de filtros, como los de carbón activado o los cerámicos, que no solo ofrecen una mayor capacidad de purificación, sino también una menor resistencia al flujo de agua. Estos filtros podrían garantizar una mayor eliminación de impurezas y mejorar la calidad del agua final, asegurando que el agua destilada cumpla con los estándares de calidad para consumo humano.

### 5.4.3 Profundidad de Sumersión del Dispositivo

La profundidad de sumersión del dispositivo en el cuerpo de agua puede influir directamente en su rendimiento. Se recomienda realizar estudios adicionales sobre cómo varía la eficiencia del sistema con diferentes profundidades. Un mayor contacto con el agua podría mejorar la transferencia de calor, y ajustar esta variable podría optimizar la eficiencia de la destilación, especialmente en condiciones donde la radiación solar es variable.

### 5.4.4 Dispositivos en Serie

Conectar varios evaporadores solares en serie podría incrementar significativamente la capacidad de destilación, lo que permitiría procesar mayores volúmenes de agua de manera más eficiente. Estudiar la viabilidad y los beneficios de este enfoque en aplicaciones a gran escala, podría ser clave para escalar el sistema y optimizar su uso en diversas situaciones.

### 5.4.5 Uso de Bombas de Vacío

Incorporar bombas de vacío podría mejorar la eficiencia del proceso de destilación, ya que al reducir la presión sobre el agua, se podría bajar el punto de ebullición y facilitar la evaporación a temperaturas más bajas. Este enfoque podría aumentar la eficiencia energética del sistema, reduciendo la necesidad de alta irradiación solar, y permitir una destilación más eficiente en condiciones subóptimas.

## 6. CONCLUSIÓN

El estudio sobre el diseño y evaluación del prototipo de evaporador solar flotante permitió analizar su funcionamiento en condiciones tanto de laboratorio como al aire libre, identificando aspectos clave para mejorar su desempeño. Este sistema, diseñado para operar en superficies acuáticas, integra elementos fundamentales como la geometría, los materiales utilizados y sistemas de control de temperatura y flujo, lo que asegura su funcionalidad básica y capacidad de interconexión con otros dispositivos similares.

Los ensayos realizados en el laboratorio mostraron un desempeño más estable, alcanzando una eficiencia máxima del 12.57%. Esto se atribuye a las condiciones controladas, como una irradiación constante y un entorno térmico favorable, que permitieron evaluar con precisión la capacidad del sistema para absorber y retener calor. Además, la adición de masa al sistema mejoró la estabilidad térmica y el flujo másico, evidenciando el impacto positivo de estas estrategias en la eficiencia del evaporador.

En contraste, los ensayos al aire libre presentaron un menor rendimiento, con eficiencias que oscilaron entre el 2.93% y el 6.03%. Este comportamiento refleja los desafíos inherentes a las condiciones variables del entorno, como la fluctuación de la radiación solar, las temperaturas ambientales y los efectos del viento y la nubosidad. Estas condiciones dificultaron la captación de calor y la estabilización térmica, resaltando la importancia de adaptar el diseño del sistema para mejorar su capacidad de operar en entornos reales.

La comparación del prototipo con otros sistemas de evaporación solar, como el tipo caseta con pendiente variable, mostró diferencias significativas en términos de eficiencia. El evaporador tipo caseta alcanzó una eficiencia máxima del 45.16%, gracias a un diseño optimizado para captar y transferir calor de manera más efectiva. Este contraste evidencia la necesidad de mejorar el diseño del prototipo flotante, enfocándose en la captación de radiación solar y la estabilidad térmica para incrementar su rendimiento.

Por otro lado, el análisis térmico destacó que la temperatura ambiental tiene un impacto directo en el desempeño del sistema. En el laboratorio, las temperaturas dentro del evaporador fueron significativamente más altas que las externas, favoreciendo un proceso de evaporación más eficiente. Sin embargo, al aire libre, las fluctuaciones térmicas afectaron negativamente la eficiencia, subrayando la relevancia de controlar y estabilizar las condiciones térmicas para mejorar el rendimiento del sistema.

En conclusión, los resultados obtenidos reflejan que el rendimiento del evaporador solar flotante depende considerablemente de las condiciones de operación, siendo más eficiente en entornos controlados debido a la estabilidad proporcionada por la irradiación constante. En entornos reales, el desempeño es afectado por la variabilidad de los factores climáticos, lo que pone de manifiesto la necesidad de optimizar su diseño para mejorar la captación de radiación solar, la estabilidad térmica y su capacidad de adaptación a diferentes condiciones ambientales. Estas mejoras acercarían el prototipo a los niveles de eficiencia observados en otros diseños avanzados y ofrecerían una solución más robusta y eficaz para su uso en aplicaciones específicas como áreas de relaves mineros.

## 7. REFERENCIAS

- Gleick, PH (2018). El agua en el mundo, volumen 8: Informe bienal sobre los recursos de agua dulce. Island Press.
- Tiwari, GN y Rao, S. (2020). Destilación solar: tecnología, economía y aplicaciones. Elsevier.
- Naciones Unidas. (2021). Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo 2021: Valorar el agua . ONU-Agua.
- Zhu, L., et al. (2019). "Diseño y evaluación del rendimiento de sistemas de destilación solar". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , 109, 284-297 <https://solar-energia.net/>.
- C. Venegas Coll. «Diseño y construcción de un concentrador lineal Fresnel». Universidad Técnica Federico Santa María título de Ingeniero Civil Mecánico, Mención Energía, 2017. <https://repositorio.usm.cl/handle/11673/23305>.
- Colmenares Angarita, S. M., & Pinzón Rangel, J. A. (2017). *Diseño, construcción y pruebas de un destilador solar*. Universidad Pontificia Bolivariana, Escuela de Ingeniería y Administración, Bucaramanga.
- Cristina Novillo. «que es la condensación del agua», 30 de mayo de 2019. <https://www.ecologiaverde.com/que-es-condensacion-del-agua-y-ejemplos-1999.html>.
- Villegas, C. I. C. (2019). Transferencia De Calor y Masa, 4ta ed. Cengel McGraw Hill. *Itboc*. [https://www.academia.edu/38408494/Transferencia\\_De\\_Calor\\_y\\_Masa\\_4ta\\_ed\\_Cengel\\_McGraw\\_Hill](https://www.academia.edu/38408494/Transferencia_De_Calor_y_Masa_4ta_ed_Cengel_McGraw_Hill)
- *El primer destilador solar de Charles Wilson*. (2012, 17 febrero). Historia del Agua En el Desierto Más Árido del Mundo. <https://historiadelagua.wordpress.com/el-primer-destilador-solar-de-charles-wilson/>
- procoler. (2022). *Destiladores* - *Página* 5. Udistrital.edu.co. <https://rita.udistrital.edu.co/procoler2/index.php/secciones/fuentes-renovables/energia-solar/energia-solar-termica?start=4>
- Pérez, F. (2009). *Tecnologías de Destilación Solar*. Editorial Energía Verde.
- Hernández, C. (2011). *Prototipos y avances en destiladores solares*. Revista de Energía Renovable
- González, A. (2013). *Diseño de destiladores solares tipo dos vertientes*. Journal of Renewable Energy
- López, M. (2017). *Eficiencia en destilación solar: Análisis de sistemas de dos vertientes*. Energía Solar
- Martínez, E. (2012). *Innovaciones en sistemas de destilación tipo cascada*. Solar Energy Review, 19(3), 67-73.
- Rodríguez, P. (2016). *Aplicaciones y eficiencia en destiladores solares tipo cascada*. Boletín de Energía Solar
- Mora, J. (2014). *Eficiencia de destiladores solares tipo esférico de barrera*. Revista de Energías Alternativas
- *Destilador solar.pptx2*. (2024). SlideShare; Slideshare. <https://es.slideshare.net/slideshow/destilador-solarpptx2-15178644/15178644>
- Moebs, W., Ling, S. J., & Sanny, J. (2021, 28 septiembre). *14.4 Principio de Arquímedes y flotabilidad - Física universitaria volumen 1 | OpenStax*. <https://openstax.org/books/f%C3%ADsica-universitaria-volumen-1/pages/14-4-principio-de-arquimedes-y-flotabilidad>
- <https://agrometeorologia.cl/RD>
- Garg, H.P., & Agarwal, S. (2000). *Solar Energy: Fundamentals and Applications*. Taylor & Francis.
- Howell, J.R., MacAdams, R.W., Murthy, P.P., & Perkins, H.B. (2011). *Thermal Radiation Heat Transfer*. Taylor & Francis.
- Incropera, F.P., & DeWitt, D.P. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Wiley.
- Cengel, Y.A., & Boles, M.A. (2015). *Thermodynamics: An Engineering Approach*. McGraw-Hill Education.
- Sopian, K., & Kalogirou, S.A. (1999). *Solar Distillation Systems: A Review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews.

**ANEXO A**

A.1 Datos radiación variable ensayos aire libre obtenidos desde estación Santa Lucía, ubicada en Florida, perteneciente a la red agropecuaria del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA).

Nº Ensayo	Radiación												
	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00
1	495.6	683.7	837.1	946.0	998.0	992.8	915.5	796.1	642.7	458.5	259.4	52.4	2.8
2	466.6	626.8	823.9	933.0	989.2	990.8	949.0	810.0	643.3	454.2	251.3	52.7	2.9
3	400.2	335.7	319.2	444.2	347.0	346.6	459.0	358.6	618.6	485.0	255.8	52.1	3.1
4	484.6	402.5	870.2	993.0	1024.8	1004.2	939.8	812.8	654.4	469.9	272.1	61.8	3.7
5	482.7	670.3	818.0	908.2	946.8	778.5	928.5	809.6	651.9	469.4	272.5	62.6	4.5

Nº Ensayo	Radiación																										
	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00
6	284.7	68.1	4.7	0.4	0.9	0.9	1.1	0.9	0.9	1.0	1.0	6.1	103.4	282.8	478.7	665.6	823.3	938.0	999.2	992.8	925.8	813.1	661.6	474.8	276.5	-	-
7	276.5	69.7	5.1	0.6	1.0	1.0	1.0	0.9	1.1	1.1	1.0	6.1	102.5	291.3	492.4	683.6	842.9	958.2	1016.2	1014.0	951.8	834.8	672.0	490.3	290.2	-	-
8	-	73.4	5.4	0.8	1.0	0.9	1.2	1.1	1.0	0.9	0.9	6.0	97.4	280.1	477.4	665.2	821.7	934.5	990.8	990.8	933.0	823.5	670.4	481.7	282.4	76.6	-
9	-	76.6	5.7	0.8	1.1	1.0	0.7	0.8	0.9	0.8	0.5	3.5	28.7	88.1	193.6	426.8	790.6	932.0	994.5	997.2	943.5	835.2	683.6	500.2	305.0	51.3	-
10	-	-	4.2	0.5	0.9	1.0	0.8	1.0	0.7	0.9	0.8	4.0	33.6	149.5	301.0	318.9	524.8	811.2	792.0	944.5	920.2	821.2	667.2	486.1	292.4	76.4	5.8

**A.2 Especificaciones lámpara LED**
**Descripción**

Producto especializado en alumbrado de bodegas, almacenes, estacionamientos y otros espacios industriales en general.

Luminaria fabricada a base de aluminio forjado pero ligero, cuenta con un dissipador de calor de aluminio puro que produce una eficiencia lumínica superior, acompañado con una excelente gestión térmica.

Tipo de Chip LED: SMD 2835

Imagen N°1: Proceso de destilación



Propiedades	
Color de Acabado	Negro
Material de la carcasa	Aluminio
Temperatura Operativa	-40 - 50°C

**Características Técnicas**

Código	1000202027
Potencia	150 W
Flujo lumínico	16500 Lm
Eficiencia	110 Lm/W
Voltaje	AC 220-240V
CRI	80
Temperatura de color	6500K
Hermeticidad	IP 65
Dimensiones	φ310×99mm
Grado de Protección	IK 08
Duración	30.000 Hrs
Factor de Potencia	≥0.95

Fuente: [www.tecnoluminacion.cl](http://www.tecnoluminacion.cl)

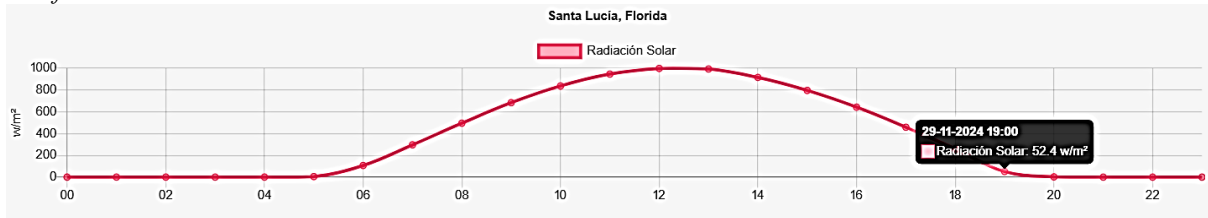
A.3 Datos obtenidos desde estación Santa Lucía, ubicada en Florida.



Imagen N°2: Ubicación estación Santa Lucía, ubicada en Florida

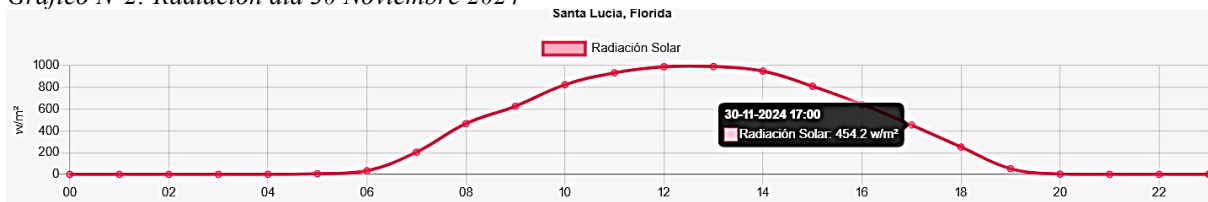
Fuente: <https://agrometeorologia.cl/RD>

Gráfico N°1: Radiación día 29 Noviembre 2024



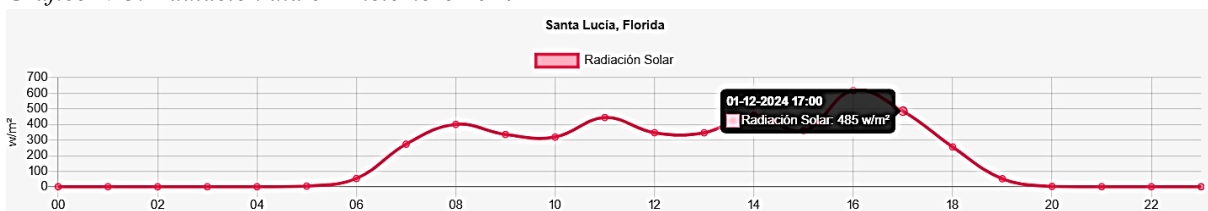
Fuente: <https://agrometeorologia.cl/RD>

Gráfico N°2: Radiación día 30 Noviembre 2024



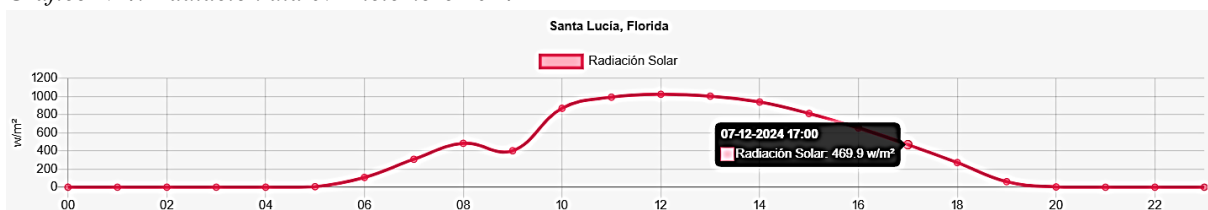
Fuente: <https://agrometeorologia.cl/RD>

Gráfico N°3: Radiación día 01 Diciembre 2024



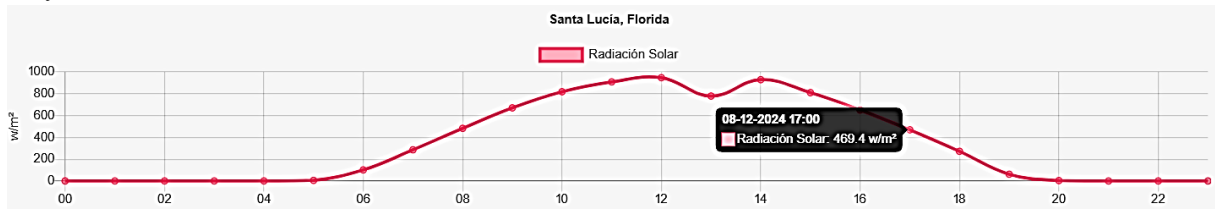
Fuente: <https://agrometeorologia.cl/RD>

Gráfico N°4: Radiación día 07 Diciembre 2024



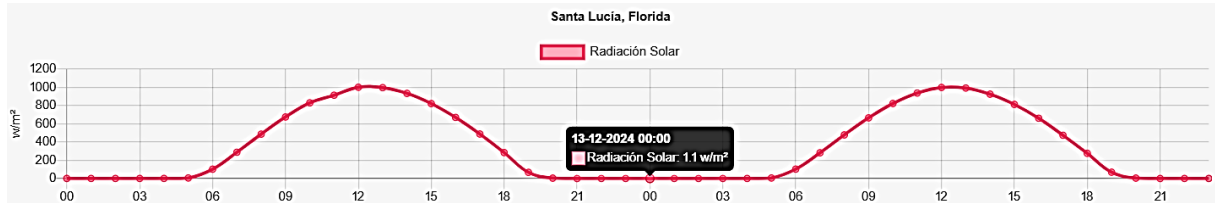
Fuente: <https://agrometeorologia.cl/RD>

Gráfico N°5: Radiación 08 Diciembre 2024



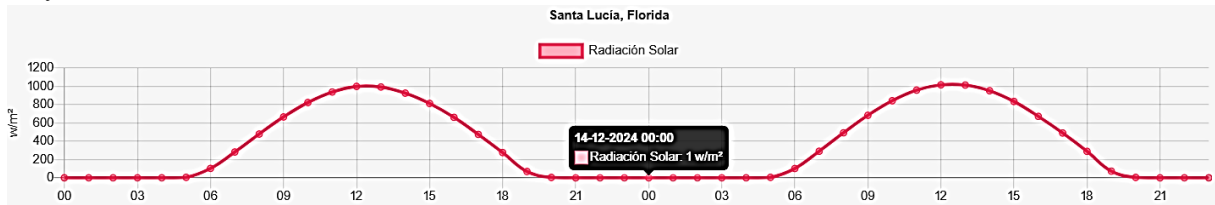
Fuente: <https://agrometeorologia.cl/RD>

Gráfico N°6: Radiación día 12 al 13 Diciembre 2024



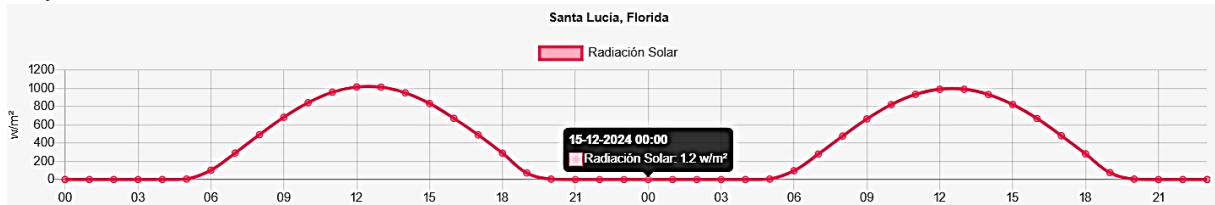
Fuente: <https://agrometeorologia.cl/RD>

Gráfico N°7: Radiación día 13 al 14 Diciembre 2024



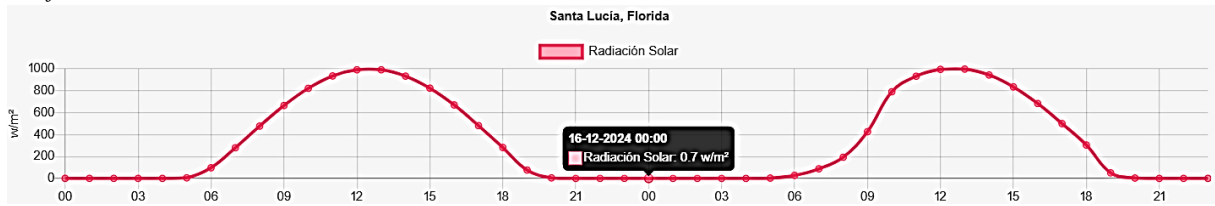
Fuente: <https://agrometeorologia.cl/RD>

Gráfico N°8: Radiación día 14 al 15 Diciembre 2024



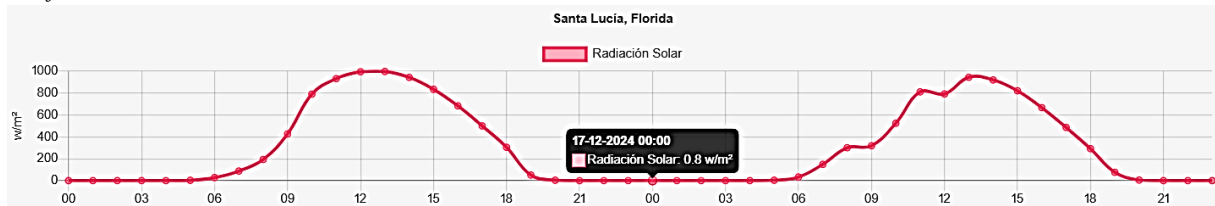
Fuente: <https://agrometeorologia.cl/RD>

Gráfico N°9: Radiación día 15 al 16 Diciembre 2024



Fuente: <https://agrometeorologia.cl/RD>

Gráfico N°10: Radiación día 016 al 17 Diciembre 2024



Fuente: <https://agrometeorologia.cl/RD>



## A.4 Datos obtenidos de temperatura ambiental ( $T_{\text{ambiental}}$ ) laboratorio

### Temperatura ambiental promedio laboratorio

N° Horas	Horas (h)	T° Dentro Evaporador	T° Fuera Evaporador
1	10:00	28.7	26.8
2	11:00	42.5	40.2
3	12:00	45.5	41.6
4	13:00	46.5	43.4
5	14:00	47.0	43.4
6	15:00	47.3	43.4
7	16:00	47.4	43.2
8	17:00	47.6	43.5
9	18:00	47.8	43.6
10	19:00	48.0	43.9
11	20:00	48.3	44.2
12	21:00	48.4	44.2
13	22:00	48.4	44.0
14	23:00	48.4	43.9
15	0:00	48.3	43.9
16	1:00	48.3	43.9
17	2:00	48.3	43.7
18	3:00	48.3	43.7
19	4:00	48.2	43.6
20	5:00	48.2	43.5
21	6:00	48.2	43.6
22	7:00	48.3	43.8
23	8:00	48.5	44.1
24	9:00	48.6	44.0
25	10:00	48.6	44.1

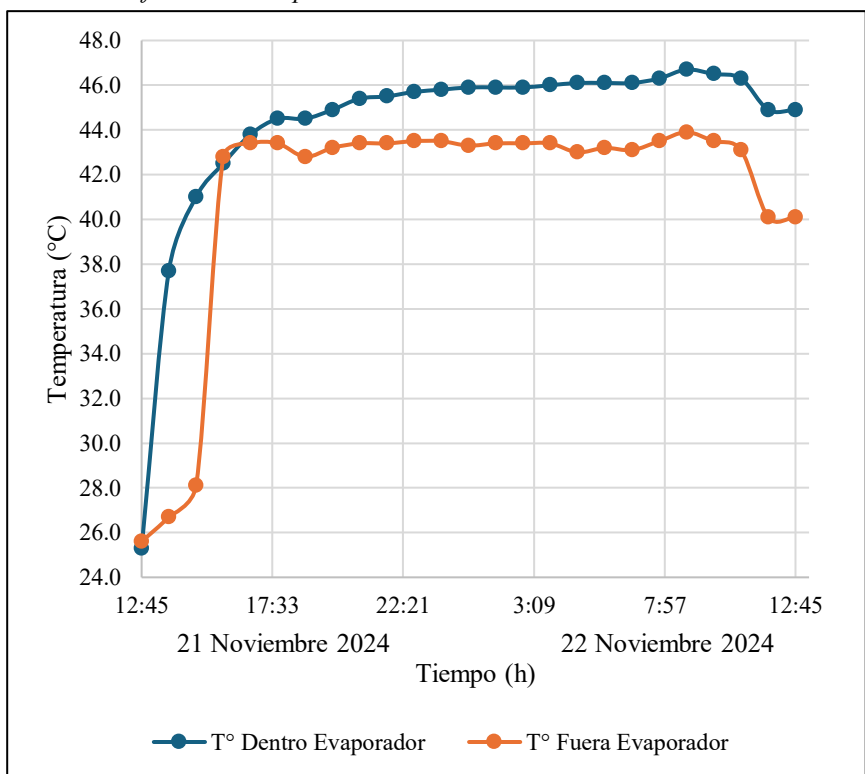
Fuente: Elaboración propia

Tabla N°1: Temperatura ambiental

Ensayo N°1		
Hora (24hrs)	T° Dentro Evaporador	T° Fuera Evaporador
12:45	25.3	25.6
13:45	37.7	26.7
14:45	41.0	28.1
15:45	42.5	42.8
16:45	43.8	43.4
17:45	44.5	43.4
18:45	44.5	42.8
19:45	44.9	43.2
20:45	45.4	43.4
21:45	45.5	43.4
22:45	45.7	43.5
23:45	45.8	43.5
0:45	45.9	43.3
1:45	45.9	43.4
2:45	45.9	43.4
3:45	46.0	43.4
4:45	46.1	43.0
5:45	46.1	43.2
6:45	46.1	43.1
7:45	46.3	43.5
8:45	46.7	43.9
9:45	46.5	43.5
10:45	46.3	43.1
11:45	44.9	40.1
12:45	44.9	40.1

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N°1: Temperatura ambiental 21 al 22 Noviembre 2024



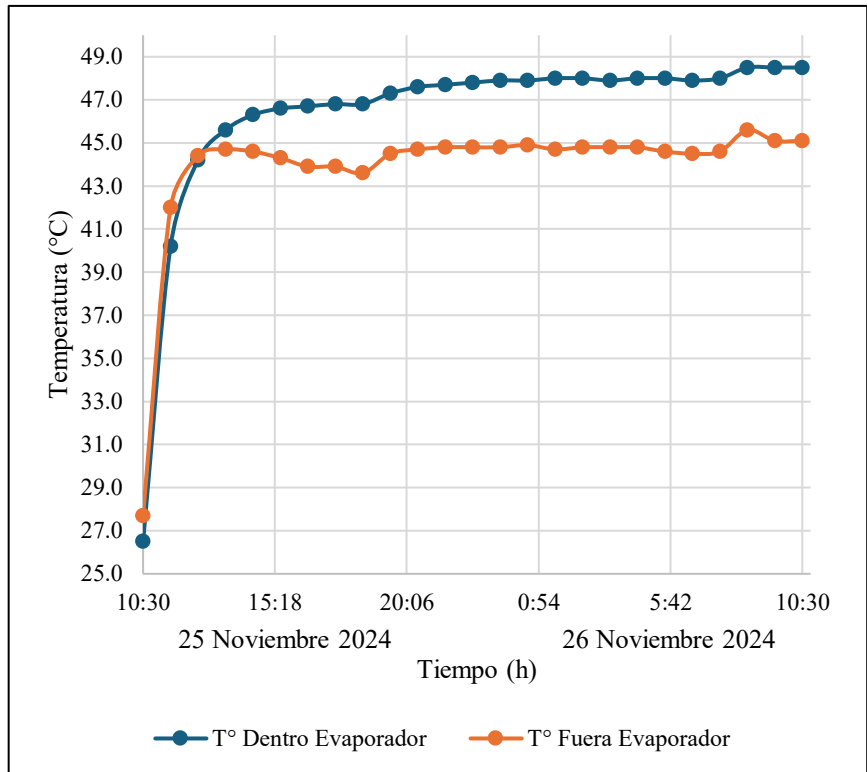
Fuente: Elaboración propia

Tabla N°2: Temperatura ambiental

Ensayo N°2		
Hora (24hrs)	T° Dentro Evaporador	T° Fuera Evaporador
10:30	26.5	27.7
11:30	40.2	42.0
12:30	44.2	44.4
13:30	45.6	44.7
14:30	46.3	44.6
15:30	46.6	44.3
16:30	46.7	43.9
17:30	46.8	43.9
18:30	46.8	43.6
19:30	47.3	44.5
20:30	47.6	44.7
21:30	47.7	44.8
22:30	47.8	44.8
23:30	47.9	44.8
0:30	47.9	44.9
1:30	48.0	44.7
2:30	48.0	44.8
3:30	47.9	44.8
4:30	48.0	44.8
5:30	48.0	44.6
6:30	47.9	44.5
7:30	48.0	44.6
8:30	48.5	45.6
9:30	48.5	45.1
10:30	48.5	45.1

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N°2: Temperatura ambiental 25 al 26 Noviembre 2024



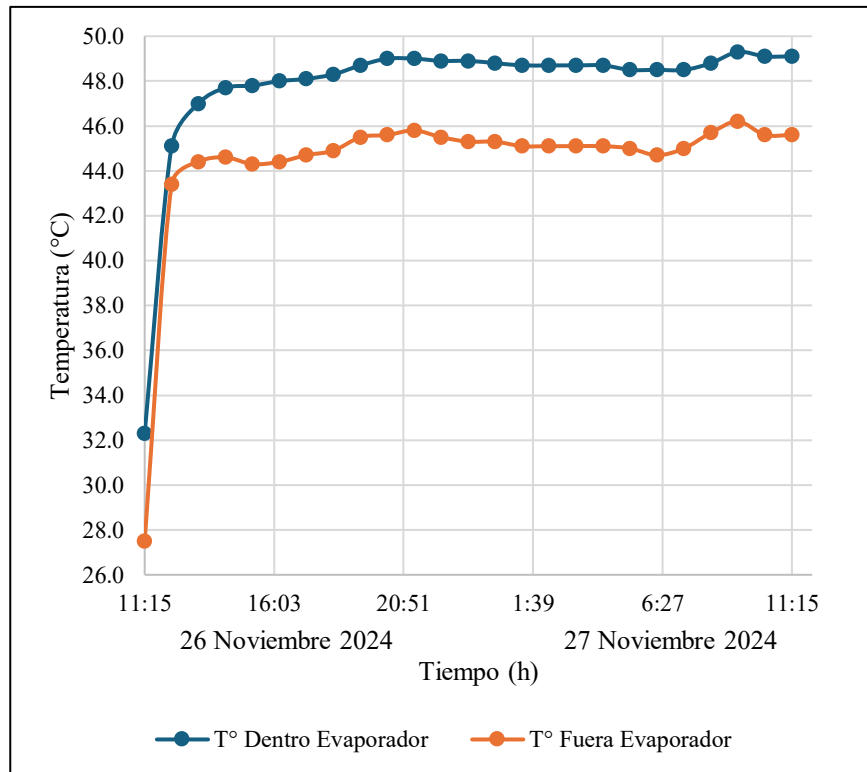
Fuente: Elaboración propia

Tabla N°3: Temperatura ambiental

Ensayo N°3		
Hora (24hrs)	T° Dentro Evaporador	T° Fuera Evaporador
11:15	32.3	27.5
12:15	45.1	43.4
13:15	47.0	44.4
14:15	47.7	44.6
15:15	47.8	44.3
16:15	48.0	44.4
17:15	48.1	44.7
18:15	48.3	44.9
19:15	48.7	45.5
20:15	49.0	45.6
21:15	49.0	45.8
22:15	48.9	45.5
23:15	48.9	45.3
0:15	48.8	45.3
1:15	48.7	45.1
2:15	48.7	45.1
3:15	48.7	45.1
4:15	48.7	45.1
5:15	48.5	45.0
6:15	48.5	44.7
7:15	48.5	45.0
8:15	48.8	45.7
9:15	49.3	46.2
10:15	49.1	45.6
11:15	49.1	45.6

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N°3: Temperatura ambiental 26 al 27 Noviembre 2024



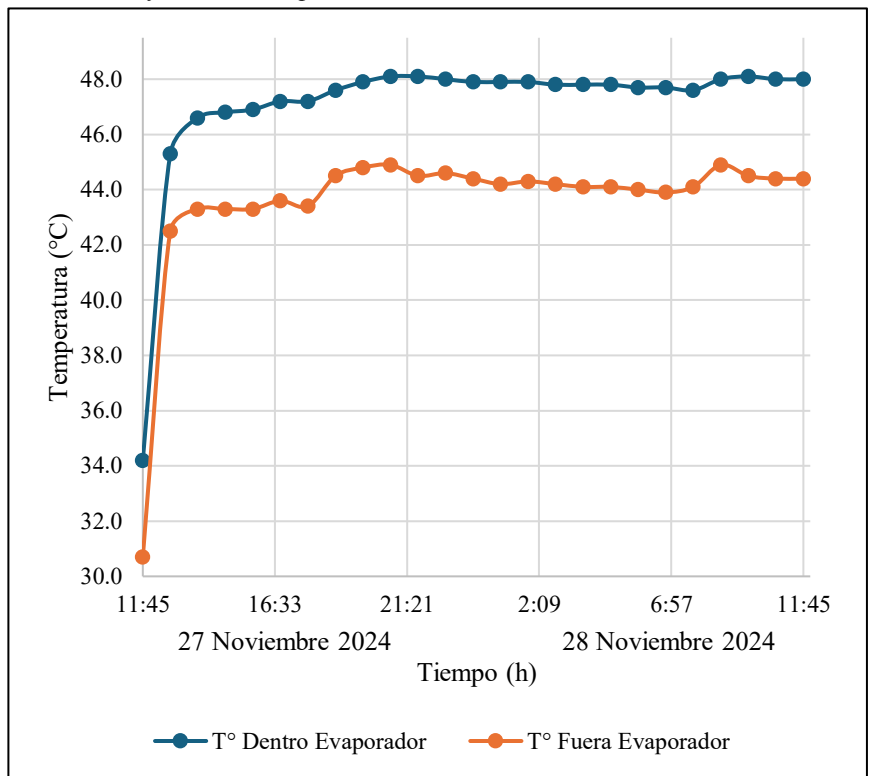
Fuente: Elaboración propia

Tabla N°4: Temperatura ambiental

Ensayo N°4		
Hora (24hrs)	T° Dentro Evaporador	T° Fuera Evaporador
11:45	34.2	30.7
12:45	45.3	42.5
13:45	46.6	43.3
14:45	46.8	43.3
15:45	46.9	43.3
16:45	47.2	43.6
17:45	47.2	43.4
18:45	47.6	44.5
19:45	47.9	44.8
20:45	48.1	44.9
21:45	48.1	44.5
22:45	48.0	44.6
23:45	47.9	44.4
0:45	47.9	44.2
1:45	47.9	44.3
2:45	47.8	44.2
3:45	47.8	44.1
4:45	47.8	44.1
5:45	47.7	44.0
6:45	47.7	43.9
7:45	47.6	44.1
8:45	48.0	44.9
9:45	48.1	44.5
10:45	48.0	44.4
11:45	48.0	44.4

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N°4: Temperatura ambiental 27 al 28 Noviembre 2024



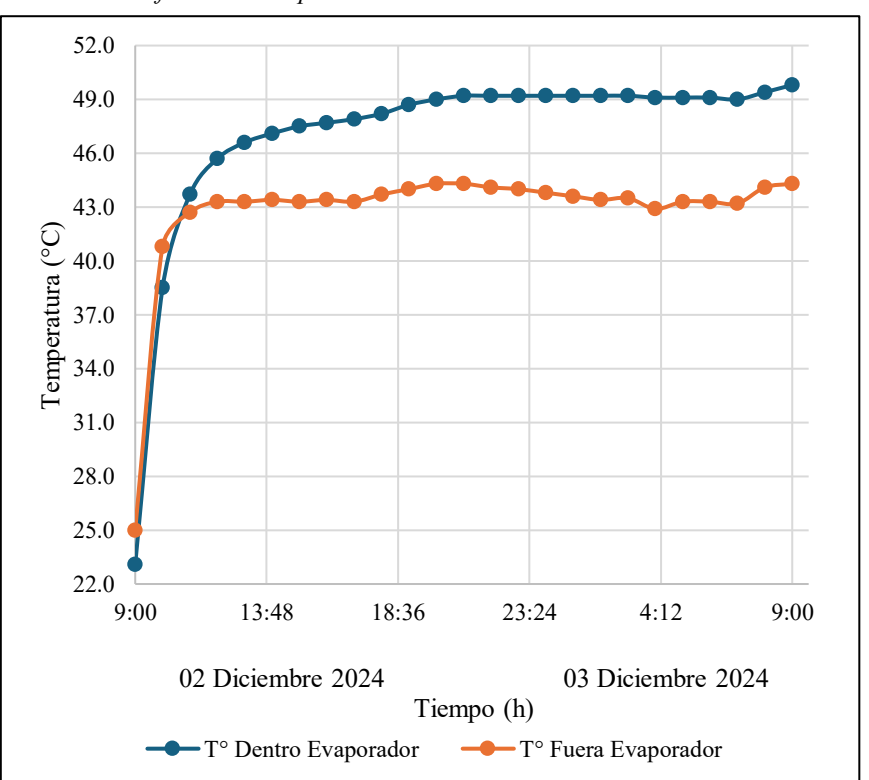
Fuente: Elaboración propia

Tabla N°5: Temperatura ambiental

Ensayo N°5		
Hora (24hrs)	T° Dentro Evaporador	T° Fuera Evaporador
9:00	23.1	25.0
10:00	38.5	40.8
11:00	43.7	42.7
12:00	45.7	43.3
13:00	46.6	43.3
14:00	47.1	43.4
15:00	47.5	43.3
16:00	47.7	43.4
17:00	47.9	43.3
18:00	48.2	43.7
19:00	48.7	44.0
20:00	49.0	44.3
21:00	49.2	44.3
22:00	49.2	44.1
23:00	49.2	44.0
0:00	49.2	43.8
1:00	49.2	43.6
2:00	49.2	43.4
3:00	49.2	43.5
4:00	49.1	42.9
5:00	49.1	43.3
6:00	49.1	43.3
7:00	49.0	43.2
8:00	49.4	44.1
9:00	49.8	44.3

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N°5 Temperatura ambiental 02 al 03 Diciembre 2024



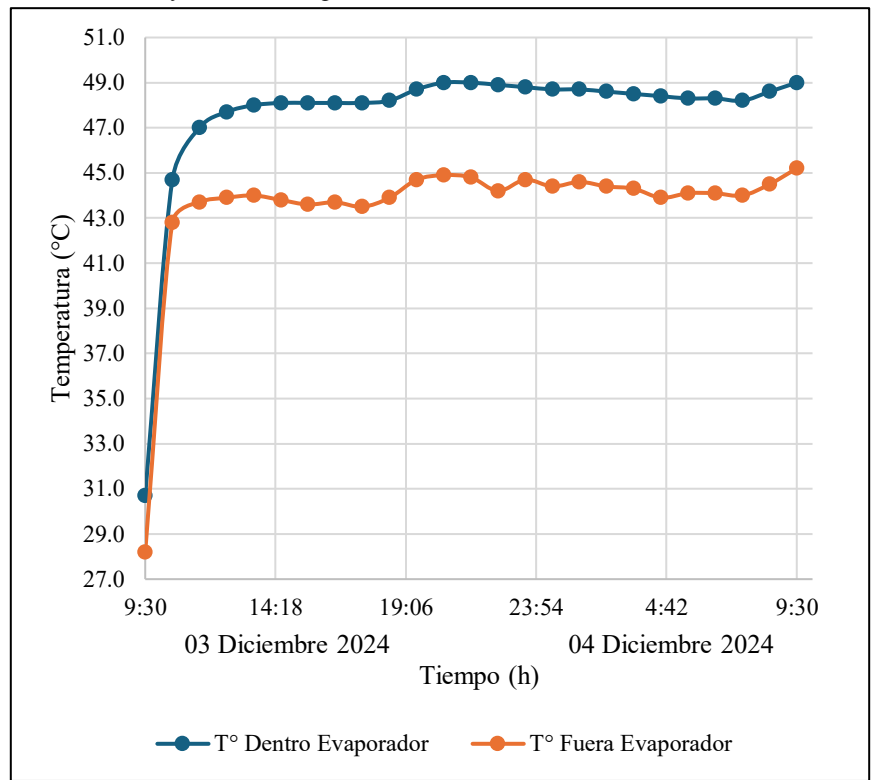
Fuente: Elaboración propia

Tabla N°6: Temperatura ambiental

Ensayo N°6		
Hora (24hrs)	T° Dentro Evaporador	T° Fuera Evaporador
9:30	30.7	28.2
10:30	44.7	42.8
11:30	47.0	43.7
12:30	47.7	43.9
13:30	48.0	44.0
14:30	48.1	43.8
15:30	48.1	43.6
16:30	48.1	43.7
17:30	48.1	43.5
18:30	48.2	43.9
19:30	48.7	44.7
20:30	49.0	44.9
21:30	49.0	44.8
22:30	48.9	44.2
23:30	48.8	44.7
0:30	48.7	44.4
1:30	48.7	44.6
2:30	48.6	44.4
3:30	48.5	44.3
4:30	48.4	43.9
5:30	48.3	44.1
6:30	48.3	44.1
7:30	48.2	44.0
8:30	48.6	44.5
9:30	49.0	45.2

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N°6: Temperatura ambiental 03 al 04 Diciembre 2024



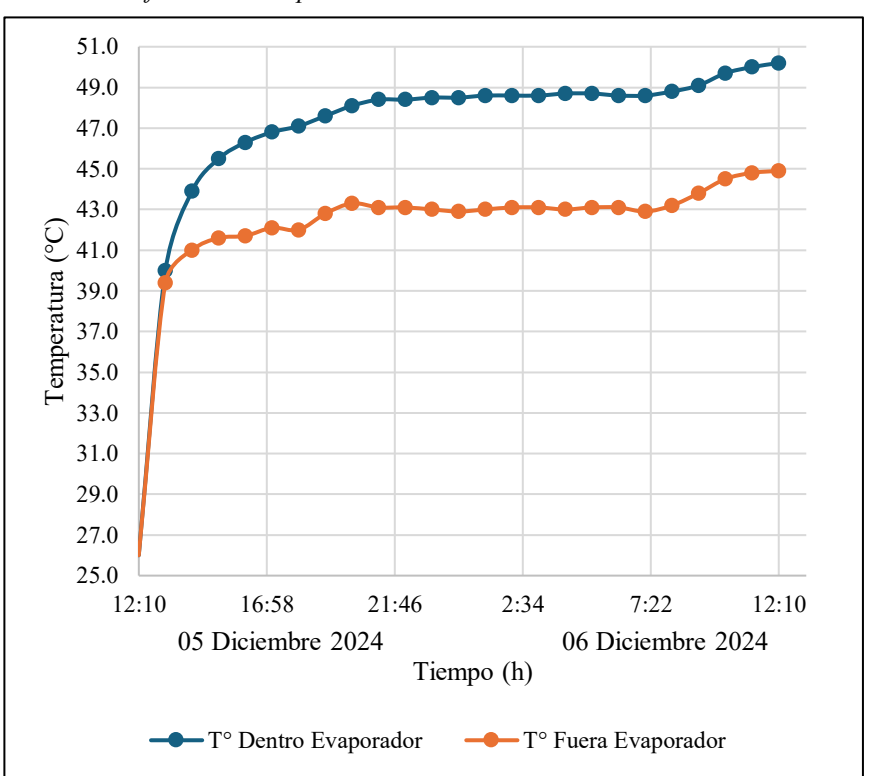
Fuente: Elaboración propia

Tabla N°7: Temperatura ambiental

Ensayo N°7		
Hora (24hrs)	T° Dentro Evaporador	T° Fuera Evaporador
12:10	26.0	26.0
13:10	40.0	39.4
14:10	43.9	41.0
15:10	45.5	41.6
16:10	46.3	41.7
17:10	46.8	42.1
18:10	47.1	42.0
19:10	47.6	42.8
20:10	48.1	43.3
21:10	48.4	43.1
22:10	48.4	43.1
23:10	48.5	43.0
0:10	48.5	42.9
1:10	48.6	43.0
2:10	48.6	43.1
3:10	48.6	43.1
4:10	48.7	43.0
5:10	48.7	43.1
6:10	48.6	43.1
7:10	48.6	42.9
8:10	48.8	43.2
9:10	49.1	43.8
10:10	49.7	44.5
11:10	50.0	44.8
12:10	50.2	44.9

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N°7: Temperatura ambiental 05 al 06 Diciembre 2024



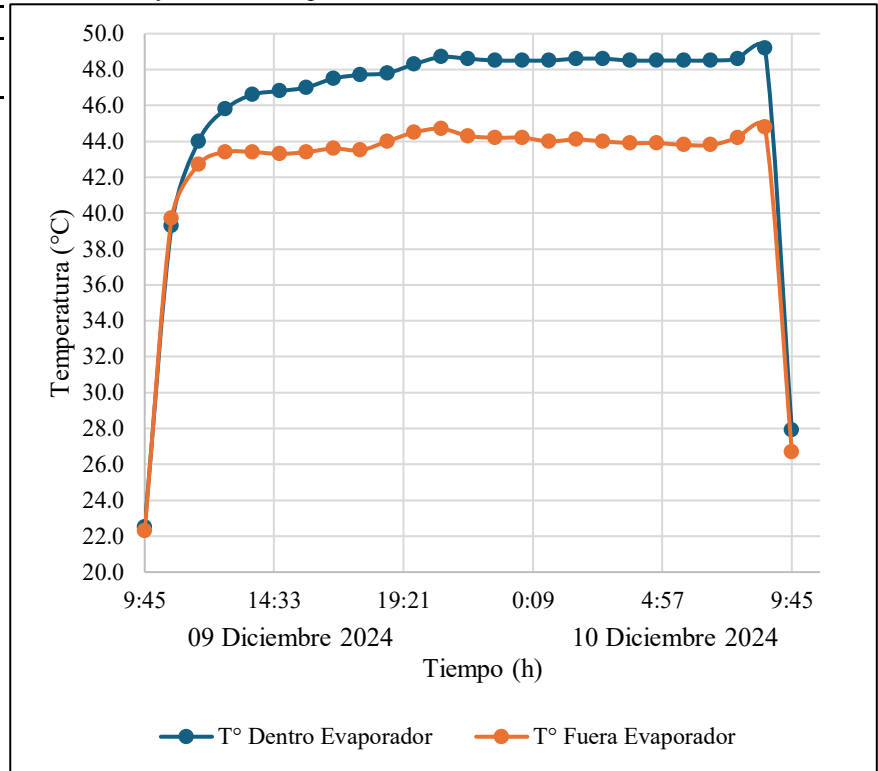
Fuente: Elaboración propia

Tabla N°8: Temperatura ambiental

Ensayo N°8		
Hora (24hrs)	T° Dentro Evaporador	T° Fuera Evaporador
9:45	22.5	22.3
10:45	39.3	39.7
11:45	44.0	42.7
12:45	45.8	43.4
13:45	46.6	43.4
14:45	46.8	43.3
15:45	47.0	43.4
16:45	47.5	43.6
17:45	47.7	43.5
18:45	47.8	44.0
19:45	48.3	44.5
20:45	48.7	44.7
21:45	48.6	44.3
22:45	48.5	44.2
23:45	48.5	44.2
0:45	48.5	44.0
1:45	48.6	44.1
2:45	48.6	44.0
3:45	48.5	43.9
4:45	48.5	43.9
5:45	48.5	43.8
6:45	48.5	43.8
7:45	48.6	44.2
8:45	49.2	44.8
9:45	27.9	26.7

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N°8: Temperatura ambiental 09 al 10 Diciembre 2024



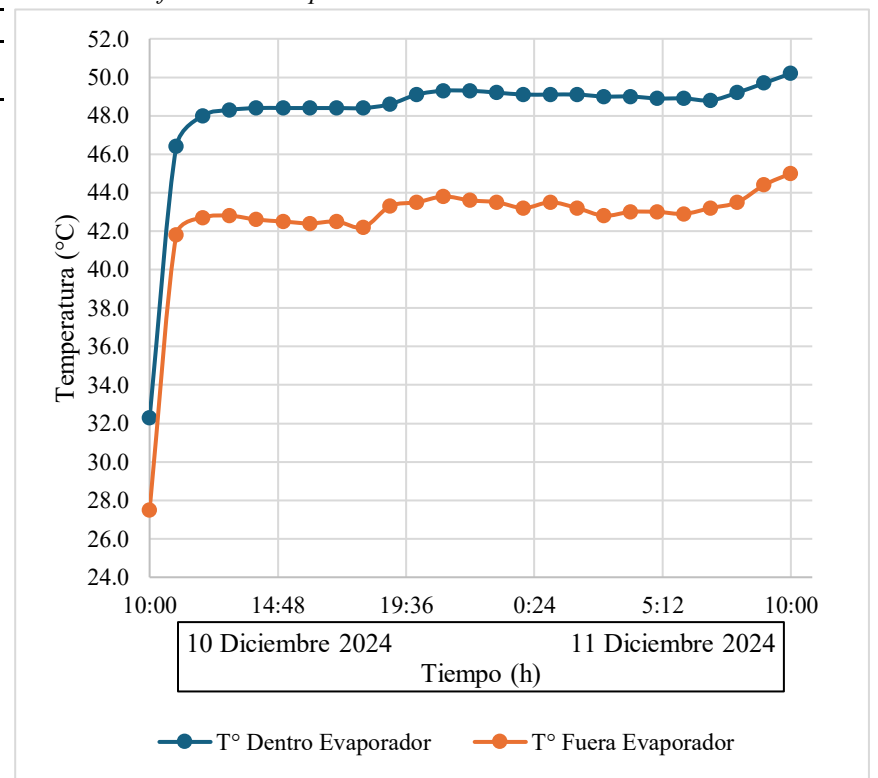
Fuente: Elaboración propia

Tabla N°9: Temperatura ambiental

Ensayo N°9		
Hora (24hrs)	T° Dentro Evaporador	T° Fuera Evaporador
10:00	32.3	27.5
11:00	46.4	41.8
12:00	48.0	42.7
13:00	48.3	42.8
14:00	48.4	42.6
15:00	48.4	42.5
16:00	48.4	42.4
17:00	48.4	42.5
18:00	48.4	42.2
19:00	48.6	43.3
20:00	49.1	43.5
21:00	49.3	43.8
22:00	49.3	43.6
23:00	49.2	43.5
0:00	49.1	43.2
1:00	49.1	43.5
2:00	49.1	43.2
3:00	49.0	42.8
4:00	49.0	43.0
5:00	48.9	43.0
6:00	48.9	42.9
7:00	48.8	43.2
8:00	49.2	43.5
9:00	49.7	44.4
10:00	50.2	45.0

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N°9: Temperatura ambiental 10 al 11 Diciembre 2024



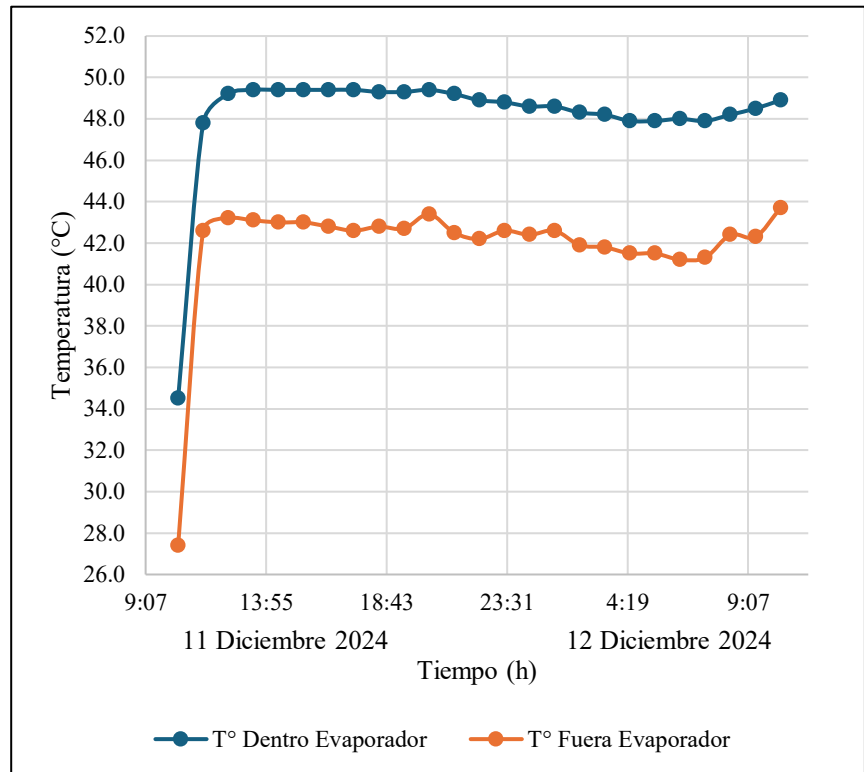
Fuente: Elaboración propia

Tabla N°10: Temperatura ambiental

Ensayo N°10		
Hora (24hrs)	T° Dentro Evaporador	T° Fuera Evaporador
10:25	34.5	27.4
11:25	47.8	42.6
12:25	49.2	43.2
13:25	49.4	43.1
14:25	49.4	43.0
15:25	49.4	43.0
16:25	49.4	42.8
17:25	49.4	42.6
18:25	49.3	42.8
19:25	49.3	42.7
20:25	49.4	43.4
21:25	49.2	42.5
22:25	48.9	42.2
23:25	48.8	42.6
0:25	48.6	42.4
1:25	48.6	42.6
2:25	48.3	41.9
3:25	48.2	41.8
4:25	47.9	41.5
5:25	47.9	41.5
6:25	48.0	41.2
7:25	47.9	41.3
8:25	48.2	42.4
9:25	48.5	42.3
10:25	48.9	43.7

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N°10: Temperatura ambiental 11 al 12 Diciembre 2024



Fuente: Elaboración propia

### A.5 Datos obtenidos de temperatura ambiental ( $T_{\text{ambiental}}$ ) aire libre

Temperatura ambiental promedio laboratorio

N° Hora	Hora (h)	T° Dentro Evaporador	T° Fuera Evaporador
1	8:00	16.6	12.2
2	9:00	27.7	16.3
3	10:00	36.1	20.2
4	11:00	38.7	22.0
5	12:00	42.4	24.7
6	13:00	45.8	26.4
7	14:00	47.1	27.3
8	15:00	48.7	28.3
9	16:00	48.0	27.7
10	17:00	46.9	26.4
11	18:00	43.4	25.8
12	19:00	40.9	23.7
13	20:00	31.6	20.7
14	21:00	27.0	19.1
15	22:00	22.7	16.6
16	23:00	19.1	14.9
17	0:00	17.1	13.8
18	1:00	15.7	13.2
19	2:00	14.5	12.5
20	3:00	13.6	12.3
21	4:00	12.9	11.9
22	5:00	12.5	11.6
23	6:00	11.8	11.3
24	7:00	11.7	11.3
25	8:00	12.6	12.4

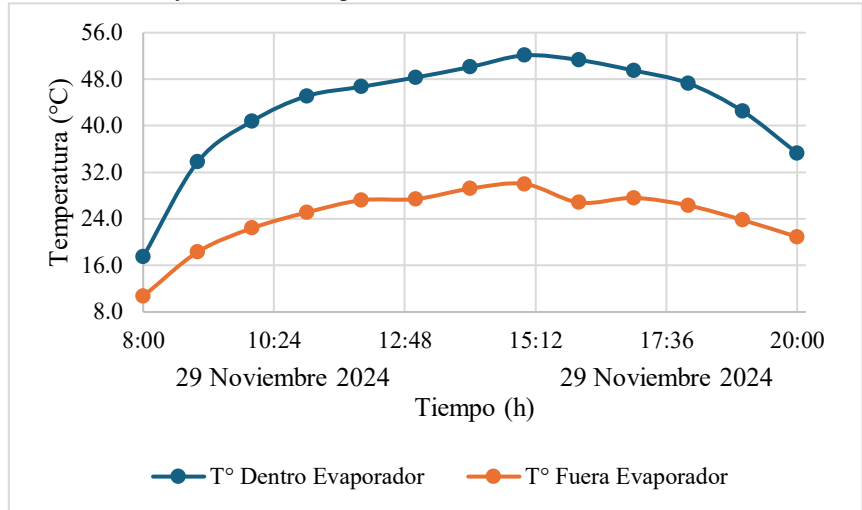
Fuente: Elaboración propia

Tabla N°11: Temperatura ambiental

Hora (12hrs)	Ensayo N°1	
	T° Dentro Evaporador	T° Fuera Evaporador
8:00	17.5	10.7
9:00	33.8	18.3
10:00	40.8	22.4
11:00	45.1	25.1
12:00	46.7	27.2
13:00	48.3	27.4
14:00	50.1	29.2
15:00	52.1	30.0
16:00	51.3	26.8
17:00	49.5	27.6
18:00	47.3	26.3
19:00	42.5	23.8
20:00	35.3	20.9

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N°11: Temperatura ambiental 29 Noviembre 2024



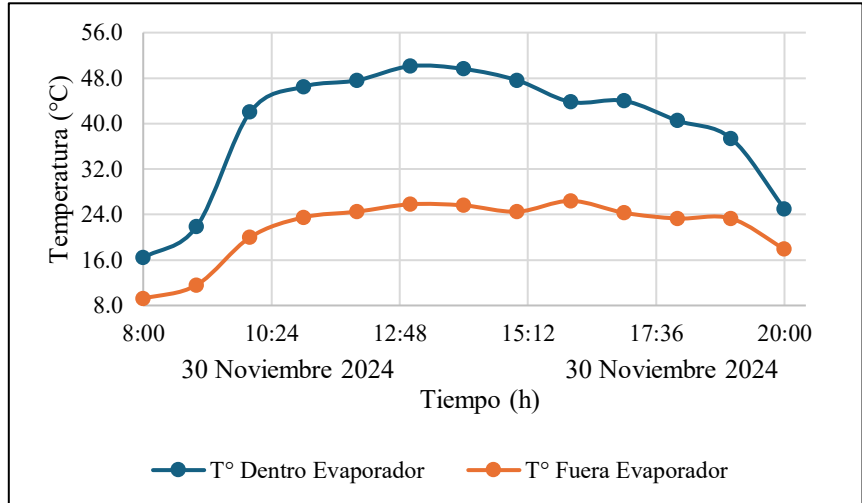
Fuente: Elaboración propia

Tabla N°12: Temperatura ambiental

Hora (12hrs)	Ensayo N°2	
	T° Dentro Evaporador	T° Fuera Evaporador
8:00	16.4	9.2
9:00	21.9	11.6
10:00	42.0	20.0
11:00	46.5	23.5
12:00	47.6	24.5
13:00	50.1	25.8
14:00	49.6	25.6
15:00	47.6	24.5
16:00	43.8	26.4
17:00	44.0	24.3
18:00	40.5	23.3
19:00	37.4	23.3
20:00	25.0	17.9

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N°12: Temperatura ambiental 30 Noviembre 2024



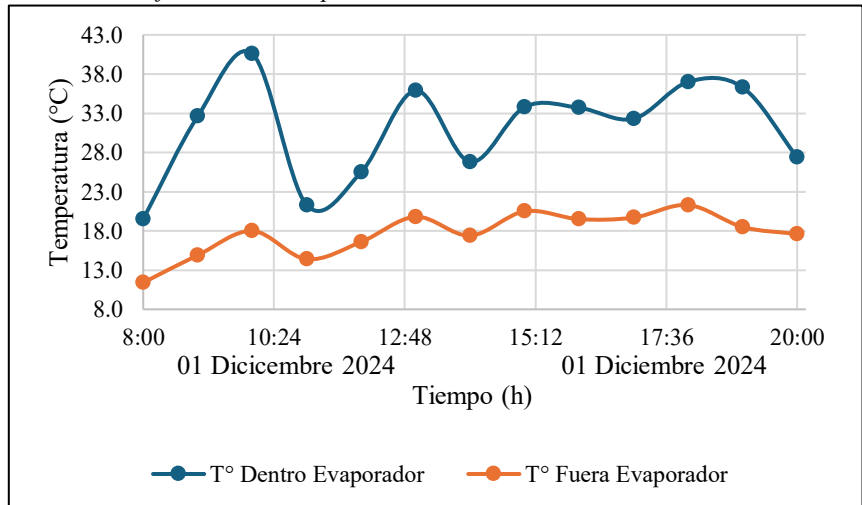
Fuente: Elaboración propia

Tabla N°13: Temperatura ambiental

Hora (12hrs)	Ensayo N°3	
	T° Dentro Evaporador	T° Fuera Evaporador
8:00	19.5	11.4
9:00	32.6	14.9
10:00	40.6	18.0
11:00	21.3	14.4
12:00	25.5	16.6
13:00	35.9	19.8
14:00	26.8	17.4
15:00	33.8	20.5
16:00	33.7	19.5
17:00	32.3	19.7
18:00	37.0	21.3
19:00	36.3	18.5
20:00	27.4	17.6

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N°13: Temperatura ambiental 01 Diciembre 2024



Fuente: Elaboración propia

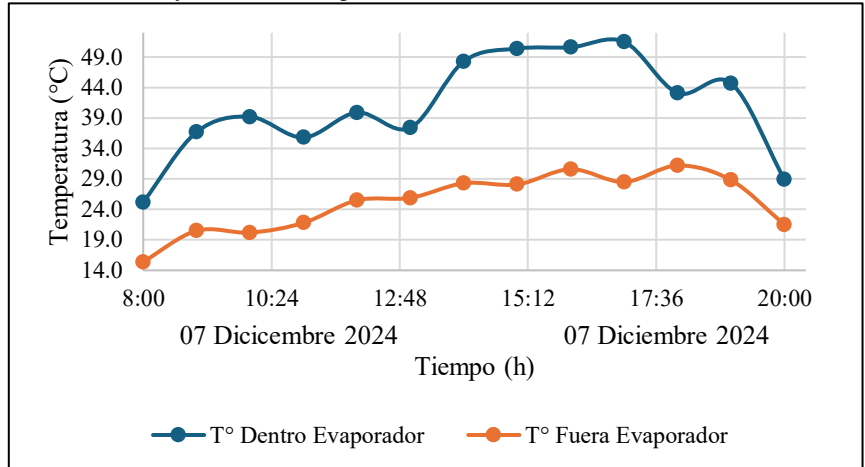


Tabla N°14: Temperatura ambiental

Ensayo N°4		
Hora (12hrs)	T° Dentro Evaporador	T° Fuera Evaporador
8:00	25.2	15.4
9:00	36.7	20.5
10:00	39.2	20.2
11:00	35.8	21.8
12:00	39.9	25.5
13:00	37.4	25.9
14:00	48.3	28.3
15:00	50.4	28.1
16:00	50.6	30.6
17:00	51.5	28.5
18:00	43.1	31.2
19:00	44.7	28.8
20:00	28.9	21.5

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N°14: Temperatura ambiental 07 Diciembre 2024



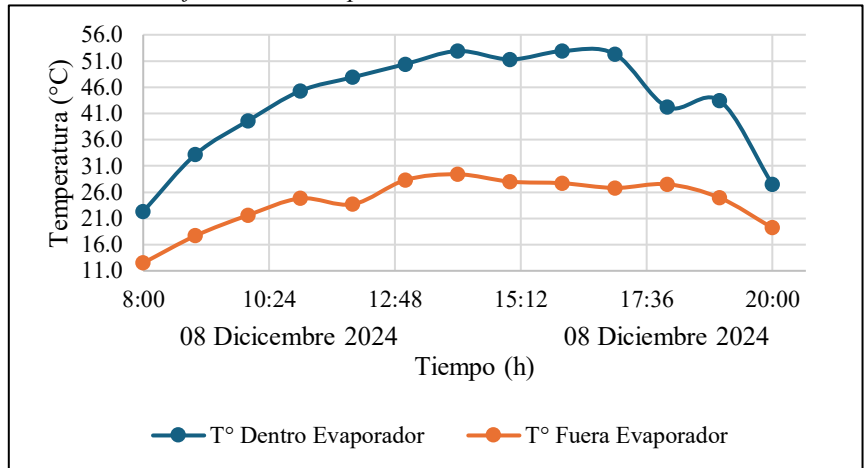
Fuente: Elaboración propia

Tabla N°15: Temperatura ambiental

Ensayo N°5		
Hora (12hrs)	T° Dentro Evaporador	T° Fuera Evaporador
8:00	22.3	12.5
9:00	33.2	17.7
10:00	39.6	21.6
11:00	45.3	24.8
12:00	47.9	23.7
13:00	50.4	28.3
14:00	52.9	29.4
15:00	51.3	28.0
16:00	52.9	27.7
17:00	52.3	26.8
18:00	42.2	27.5
19:00	43.4	24.9
20:00	27.5	19.2

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N°15: Temperatura ambiental 08 Diciembre 2024



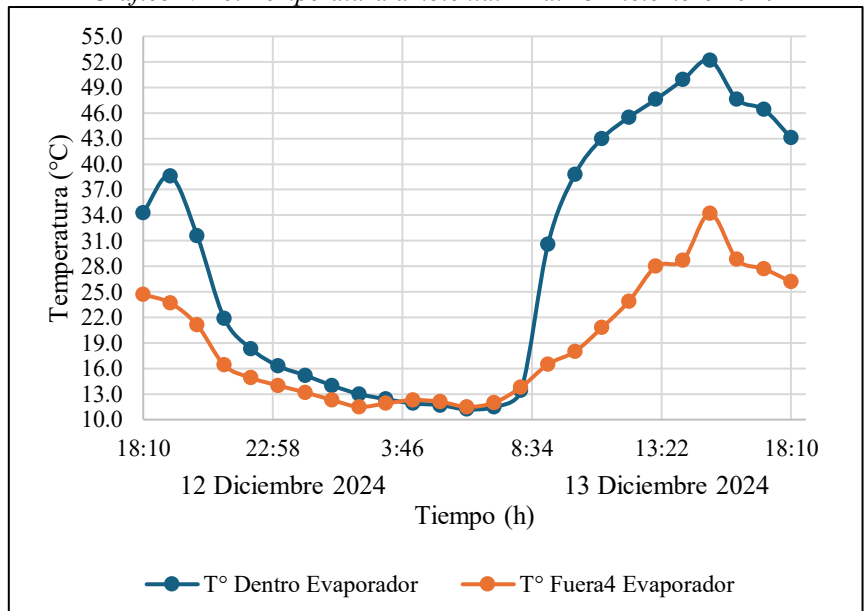
Fuente: Elaboración propia

Tabla N°16: Temperatura ambiental

Ensayo N°6		
Hora (24hrs)	T° Dentro Evaporador	T° Fuera Evaporador
18:10	34.3	24.7
19:10	38.6	23.7
20:10	31.6	21.1
21:10	21.9	16.4
22:10	18.3	14.9
23:10	16.3	14.0
0:10	15.2	13.2
1:10	14.0	12.3
2:10	13.0	11.5
3:10	12.4	11.9
4:10	11.9	12.3
5:10	11.7	12.1
6:10	11.2	11.5
7:10	11.5	12.0
8:10	13.4	13.8
9:10	30.6	16.5
10:10	38.8	18.0
11:10	43.0	20.8
12:10	45.5	23.9
13:10	47.6	28.0
14:10	49.9	28.7
15:10	52.2	34.2
16:10	47.6	28.8
17:10	46.4	27.7
18:10	43.1	26.2

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N°16: Temperatura ambiental 12 al 13 Diciembre 2024



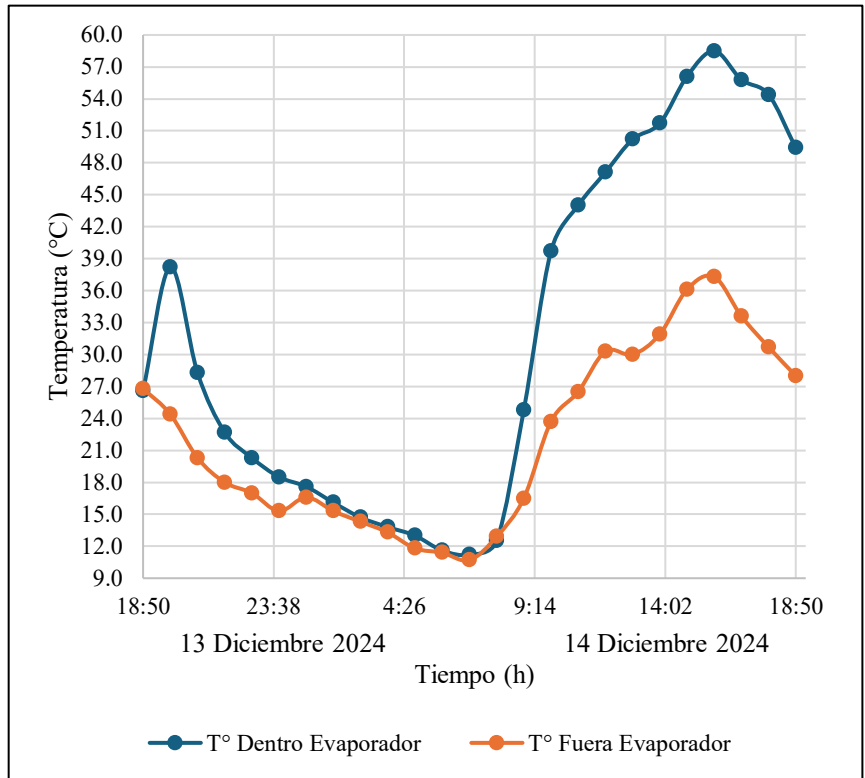
Fuente: Elaboración propia

Tabla N°17: Temperatura ambiental

Ensayo N°7		
Hora (24hrs)	T° Dentro Evaporador	T° Fuera Evaporador
18:50	26.6	26.8
19:50	38.2	24.4
20:50	28.3	20.3
21:50	22.7	18.0
22:50	20.3	17.0
23:50	18.5	15.3
0:50	17.6	16.6
1:50	16.1	15.3
2:50	14.7	14.3
3:50	13.8	13.3
4:50	13.0	11.8
5:50	11.6	11.4
6:50	11.2	10.7
7:50	12.5	12.9
8:50	24.8	16.5
9:50	39.7	23.7
10:50	44.0	26.5
11:50	47.1	30.3
12:50	50.2	30.0
13:50	51.7	31.9
14:50	56.1	36.1
15:50	58.5	37.3
16:50	55.8	33.6
17:50	54.4	30.7
18:50	49.4	28.0

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N°17: Temperatura ambiental 13 al 14 Diciembre 2024



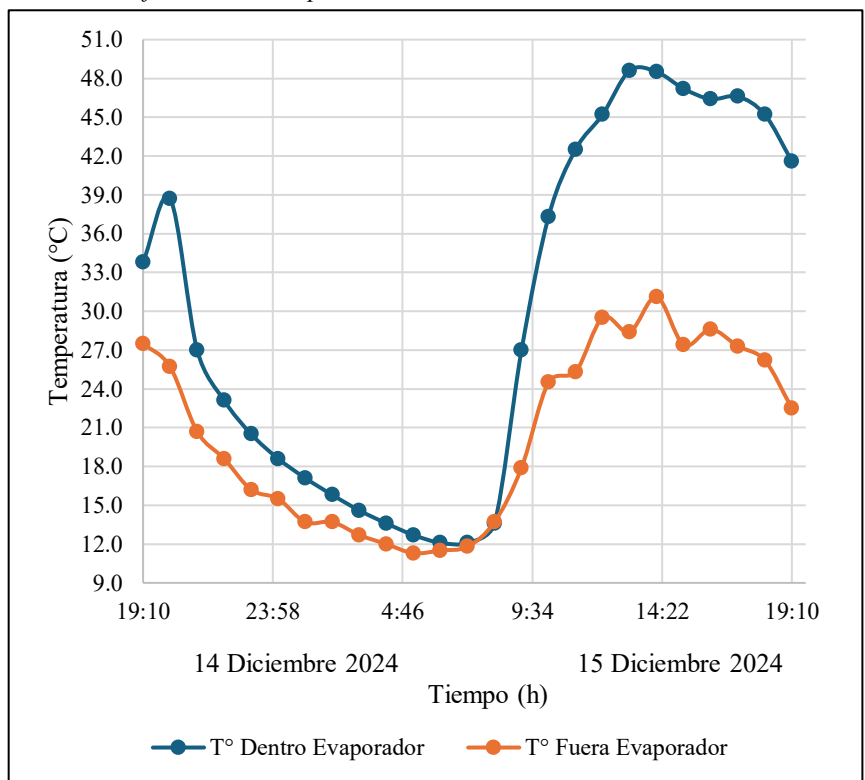
Fuente: Elaboración propia

Tabla N°18: Temperatura ambiental

Ensayo N°8		
Hora (24hrs)	T° Dentro Evaporador	T° Fuera Evaporador
19:10	33.8	27.5
20:10	38.7	25.7
21:10	27.0	20.7
22:10	23.1	18.6
23:10	20.5	16.2
0:10	18.6	15.5
1:10	17.1	13.7
2:10	15.8	13.7
3:10	14.6	12.7
4:10	13.6	12.0
5:10	12.7	11.3
6:10	12.1	11.5
7:10	12.1	11.8
8:10	13.6	13.7
9:10	27.0	17.9
10:10	37.3	24.5
11:10	42.5	25.3
12:10	45.2	29.5
13:10	48.6	28.4
14:10	48.5	31.1
15:10	47.2	27.4
16:10	46.4	28.6
17:10	46.6	27.3
18:10	45.2	26.2
19:10	41.6	22.5

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N°18: Temperatura ambiental 14 al 15 Diciembre 2024



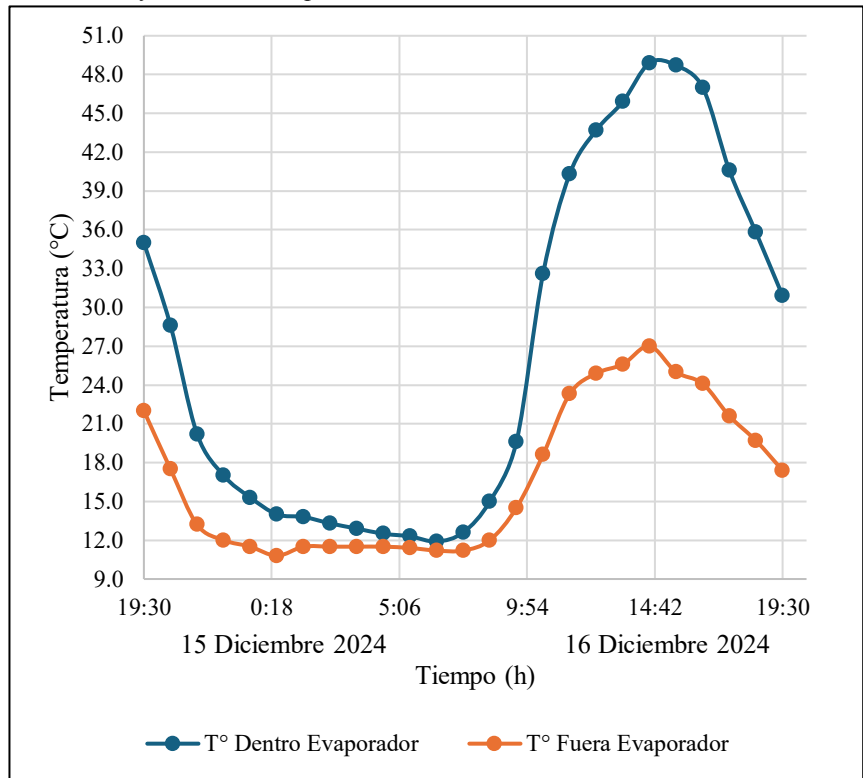
Fuente: Elaboración propia

Tabla N°19: Temperatura ambiental

Ensayo N°9		
Hora (24hrs)	T° Dentro Evaporador	T° Fuera Evaporador
19:30	35.0	22.0
20:30	28.6	17.5
21:30	20.2	13.2
22:30	17.0	12.0
23:30	15.3	11.5
0:30	14.0	10.8
1:30	13.8	11.5
2:30	13.3	11.5
3:30	12.9	11.5
4:30	12.5	11.5
5:30	12.3	11.4
6:30	11.9	11.2
7:30	12.6	11.2
8:30	15.0	12.0
9:30	19.6	14.5
10:30	32.6	18.6
11:30	40.3	23.3
12:30	43.7	24.9
13:30	45.9	25.6
14:30	48.9	27.0
15:30	48.7	25.0
16:30	47.0	24.1
17:30	40.6	21.6
18:30	35.8	19.7
19:30	30.9	17.4

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N°19: Temperatura ambiental 15 al 16 Diciembre 2024



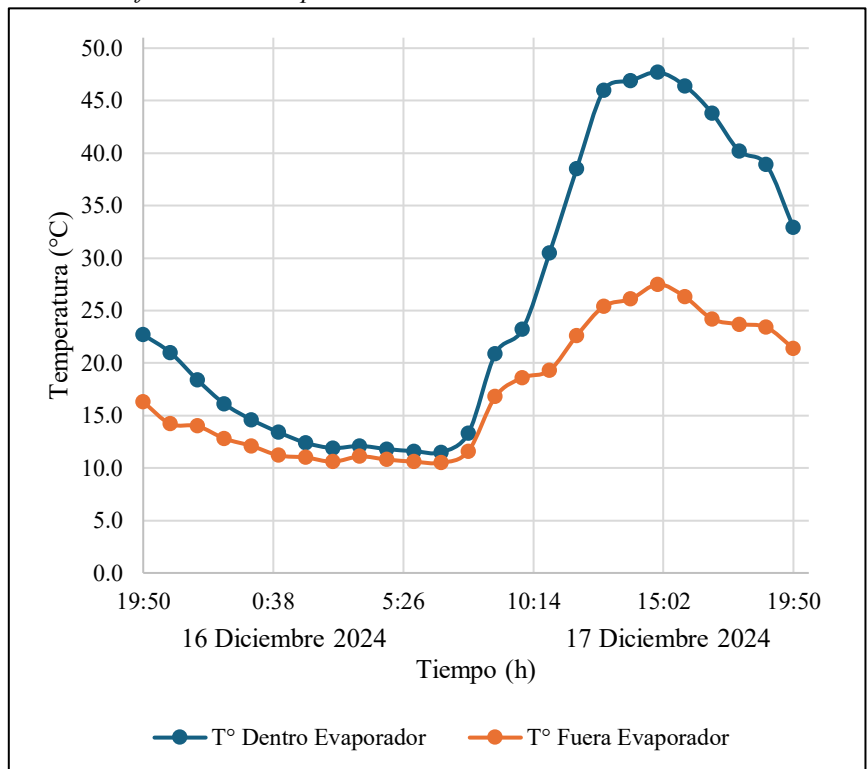
Fuente: Elaboración propia

Tabla N°20: Temperatura ambiental

Ensayo N°9		
Hora (24hrs)	T° Dentro Evaporador	T° Fuera Evaporador
19:50	22.7	16.3
20:50	21.0	14.2
21:50	18.4	14.0
22:50	16.1	12.8
23:50	14.6	12.1
0:50	13.4	11.2
1:50	12.4	11.0
2:50	11.9	10.6
3:50	12.1	11.1
4:50	11.8	10.8
5:50	11.6	10.6
6:50	11.5	10.5
7:50	13.3	11.6
8:50	20.9	16.8
9:50	23.2	18.6
10:50	30.5	19.3
11:50	38.5	22.6
12:50	46.0	25.4
13:50	46.9	26.1
14:50	47.7	27.5
15:50	46.4	26.3
16:50	43.8	24.2
17:50	40.2	23.7
18:50	38.9	23.4
19:50	32.9	21.4

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N°20: Temperatura ambiental 16 al 17 Diciembre 2024



Fuente: Elaboración propia



## A.6 Tablas comparación

Tabla N°21: Volumen recuperado de los dos evaporadores

N° Ensayo	Vd Laboratorio (m <sup>3</sup> )	Vd Aire Libre (m <sup>3</sup> )	Vd Tipo Caseta (m <sup>3</sup> )
1	1.5.E-05	2.8.E-05	1.8.E-04
2	2.0.E-05	1.4.E-05	2.0.E-04
3	1.8.E-05	1.2.E-05	2.2.E-04
4	2.2.E-05	1.4.E-05	1.1.E-04
5	1.8.E-05	2.8.E-05	9.1.E-05
6	2.3.E-05	3.0.E-05	8.9.E-05
7	2.5.E-05	3.0.E-05	1.5.E-04
8	2.8.E-05	2.7.E-05	8.5.E-05
9	2.8.E-05	2.0.E-05	2.4.E-04
10	2.8.E-05	2.0.E-05	2.3.E-04

Fuente: Elaboración propia

Tabla N°15: Rendimiento de los evaporadores

N° Ensayo	Eficiencia Laboratorio (%)	Eficiencia Aire Libre (%)	Eficiencia Tipo Caseta (%)
1	6.73	5.81	29.61
2	8.96	2.93	40.46
3	8.05	4.62	42.42
4	9.84	2.94	9.42
5	8.09	6.03	34.69
6	10.32	5.71	32.55
7	11.23	5.57	28.83
8	12.57	5.12	35.83
9	12.52	4.18	27.67
10	12.52	4.55	45.16

Fuente: Elaboración propia