

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**EFEECTO DE LA TEMPERATURA INTERNA EN LA DEMANDA DE  
POTENCIA DE UNA CÁMARA DE REFRIGERACIÓN MÓVIL ALIMENTADA  
CON ENERGÍA FOTOVOLTAICA**

**ESTEBAN RUBÉN LABRÍN VILLEGAS**

PROYECTO DE HABILITACIÓN PROFESIONAL  
PRESENTADO A LA FACULTAD DE INGENIERÍA  
AGRÍCOLA DE LA UNIVERSIDAD DE  
CONCEPCIÓN, PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO AMBIENTAL

**CHILLÁN-CHILE**

**2022**

**EFFECTO DE LA TEMPERATURA INTERNA EN LA DEMANDA DE  
POTENCIA DE UNA CÁMARA DE REFRIGERACIÓN MÓVIL  
ALIMENTADA CON ENERGÍA FOTOVOLTAICA**

Aprobado por:

David Domingo Lara Castells  
Ing. Civil Eléctrico, Dr.  
Profesor Asociado

---

Profesor Guía

Juan Antonio Cañumir Veas  
Ingeniero Agrónomo, Ph.D.  
Profesor Asociado

---

Profesor Co-Guía

Gabriel Merino Coria  
Lic. en Ciencias Física, Ph.D.  
Profesor Asociado

---

Profesor Co-Guía

Marco Antonio López Roudergue  
Ing. Civil Industrial, Mg.  
Profesor Asistente

---

Director de Departamento

María Eugenia González Rodríguez  
Ingeniera Agrónoma, Ph.D.  
Profesor Asociado

---

Decana

**ÍNDICE DE MATERIAS**

	Página
RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
1. INTRODUCCIÓN.....	3
1.1. Industria agroalimentara.....	3
1.2. Calidad de los alimentos .....	3
1.3. Producción de frío .....	4
1.4. Energía solar.....	5
1.5. Estado de arte de los sistemas de refrigeración solar .....	6
1.6. Antecedentes de sistemas de refrigeración solar.....	9
2. OBJETIVOS.....	13
2.1. Objetivo general .....	13
2.2. Objetivos específicos.....	13
3. METODOLOGÍA.....	14
3.1. Sistema de refrigeración fotovoltaico.....	14
3.2. Sistema de adquisición de datos.....	20
3.3. Registro de los datos de interés seleccionados.....	23
4. RESULTADOS Y DISCUSION.....	25
5. CONCLUSIONES .....	35
6. LITERATURA CITADA. ....	38

## ÍNDICE DE FIGURAS

		Página
Figura 1.	Diagrama esquemático de un Sistema fotovoltaico autónomo.....	9
Figura 2.	Ubicación de la cámara de frío.....	14
Figura 3.	Compresor hermético piston Embraco.....	15
Figura 4.	Esquema y diagrama P-h para el ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor.....	16
Figura 5.	Cámara de frío móvil alimentada con energía solar fotovoltaica.....	17
Figura 6.	Cámara de frío fotovoltaica utilizada para almacenar y conservar cerezas.....	19
Figura 7.	Datalogger modelo Em5b.....	20
Figura 8.	Registrador de humedad/temperature USB modelo RHT.....	21
Figura 9.	Analizador de calidad de potencia HIOKI PQ3100.....	21
Figura 10.	Ventana del programa para el manejo de datos ECH <sub>2</sub> O Utility.....	22
Figura 11	Menú desplegable del software graficador del datalogger RHT 10.....	23
Figura 12.	Arranque del compresor con 200 L de agua en la cámara de frío.....	25
Figura 13.	Temperatura externa y demanda de potencia en función del tiempo para el día 27 de enero.....	26
Figura 14.	Temperatura externa y potencia consumida en función del tiempo para el día 24 de enero.....	27

	Página
Figura 13. Temperatura externa y demanda de potencia en función del tiempo para el día 27 de enero.....	26
Figura 14. Temperatura externa y potencia consumida en función del tiempo para el día 24 de enero.....	27
Figura 15. Temperatura interna en función del tiempo para el día 24 de enero.....	28
Figura 16. Temperatura exterior y potencia del compresor en función del tiempo para el día 3 de febrero.....	29
Figura 17. Temperatura interna de la cámara y potencia consumida en función del tiempo para el día 4 de febrero.....	30
Figura 18. Temperatura interna en función del tiempo para el día 5 de febrero.....	31
Figura 19. Temperatura interna en función del tiempo para el día 24 de enero.....	32
Figura 20. Consumo de energía en función de la temperatura máxima.....	33
Figura 21. Consumo de energía en función de la temperatura de ajuste.....	34

**EFFECTO DE LA TEMPERATURA INTERNA EN LA DEMANDA DE  
POTENCIA DE UNA CÁMARA DE REFRIGERACIÓN MÓVIL  
ALIMENTADA CON ENERGÍA FOTOVOLTAICA**

**EFFECT OF INTERNAL TEMPERATURE ON THE POWER DEMAND OF A  
MOBILE PHOTOVOLTAIC-POWERED REFRIGERATION**

**Palabras claves:** Sistema fotovoltaico autónomo, refrigeración solar FV,  
refrigeración por compresión.

**RESUMEN**

El uso de la energía solar se ha incrementado en los últimos años, cubriendo demandas energéticas en distintas áreas donde el acceso al sistema interconectado se ve dificultado. La coincidencia de la demanda de producción de frío y la alta disponibilidad de radiación solar en verano hace a la energía solar particularmente atractiva para sistemas de refrigeración, es por esto que estudiaremos la eficiencia energética de una cámara de frío solar autónoma, adaptada para llegar a lugares de difícil acceso para ser utilizada en la conservación y almacenamiento de productos, dando la posibilidad de cumplir con una la cadena de frío después de su recolección. Para esto fue necesario crear un sistema de adquisición de datos a través de sensores que pudieran procesar, medir y almacenar datos de temperatura y potencia en la cámara, para luego recolectarla e interpretar los datos medidos y evaluar el desempeño energético de la cámara en condiciones ambientales locales. Los resultados obtenidos nos permitieron evaluar los límites de operación de la cámara.

## **EFFECT OF INTERNAL TEMPERATURE ON THE POWER DEMAND OF A MOBILE PHOTOVOLTAIC-POWERED REFRIGERATION**

**Keywords:** autonomous photovoltaic system, solar PV cooling, compression refrigeration.

### **SUMMARY**

The use of solar energy has increased in recent years, covering energy demands in different areas where access to the interconnected system is difficult. The coincidence of the demand for cooling production and the high availability of solar radiation in summer makes solar energy particularly attractive as an energy source for cooling systems, this is why we will study the energy efficiency of an autonomous solar cold room, adapted to reach places of difficult access to be used in the preservation and storage of products, giving the possibility to comply with the cold chain after harvesting. For this it was necessary to create a data acquisition system through sensors that could process, measure and store temperature and power data in the chamber, and then collect and interpret the measured data to evaluate the energy performance of the chamber under local environmental conditions. The results obtained allowed us to evaluate the operating limits of the chamber.

## **1.INTRODUCCIÓN**

### **1.1. Industria agroalimentaria.**

Globalmente hay una creciente demanda de alimentos. Chile a pesar de tener una superficie comparativamente pequeña, tiene ventajas como su variedad de agro-climas y un amplio borde costero lo cual lo posiciona como un candidato a potencia agroalimentaria. La tarea de que Chile se posicione entre los mejores países que compiten en esta área, debe estar enfocada en el valor de los productos alimenticios que podemos ofrecer y esto es posible si se está permanentemente agregando valor nuevo y significativo a los productos. Una forma de conseguirlo es a través de la innovación tecnológica, con un enfoque en mejorar la eficiencia energética, recursos, desempeño ambiental y la calidad de los alimentos, para ello Chile ha definido estrategias en políticas que impulsan el desarrollo de la industria agroalimentaria desde al año 2006, a través de un conjunto de lineamientos, donde destaca transversalmente el ámbito de la calidad e inocuidad de los alimentos como un elemento central (Villalobos y Rojas,2006).

### **1.2. Calidad de los alimentos.**

La calidad comercial de los productos agrícolas alimentarios está estrechamente relacionada con la vida de almacén de estos, la cual, además de asegurar la prolongación y conservación de las mismas, sirve como un control de la comercialización, equilibrando oferta y demanda. Si bien el

almacenamiento de frutas y hortalizas frescas se puede prolongar mediante tratamientos, tales como el control de enfermedades de postcosecha, regulación de la atmósfera, tratamientos químicos, irradiación y refrigeración; es esta última la que mejores resultados ha presentado en términos de calidad de frutas y hortalizas almacenadas, pues los otros métodos se muestran eficientes solo complementados con bajas temperaturas, siendo la temperatura de almacenamiento el factor ambiental más importante del proceso, debido a que regula la tasa de todos los procesos fisiológicos y bioquímicos asociados con dicho fenómeno (Parra, 2002). Por lo tanto, es imprescindible la producción de frío, la que se define como la generación de temperaturas inferiores a la ambiental, por medio no naturales (Lapuerta y armas, 2012).

### **1.3. Producción de frío.**

La producción de frío tiene una gran importancia en la actualidad en base a sus beneficios, además de su uso en la conservación de alimentos, también se usa para disminuir la temperatura ambiental cuando ésta es alta, dando confort a las personas (Lapuerta y armas, 2012). En medicina, las unidades de refrigeración son esenciales ya que la mayoría de las vacunas comunes requieren una temperatura de almacenamiento de 0°C a 8°C para mantener su efectividad, por ello es conveniente que estas sean alimentadas por una fuente de energía fiable y autónoma de la red eléctrica convencional.

Los diversos usos que tiene la producción de frío han provocado un aumento en la demanda de energía en las últimas décadas. Un estudio elaborado por el Instituto Internacional de la refrigeración en París estimó que aproximadamente el 15% de la energía eléctrica producida en todo el mundo se emplea para procesos de aire acondicionado y refrigeración, siendo los combustibles fósiles la principal fuente de energía en la actualidad (Sarbu y sebarchievici,2015).

#### **1.4. Energía solar.**

En los últimos años el estado de Chile, debido a su potencial solar, ha incrementado el uso de energía solar. De acuerdo a los anuarios estadísticos de la Comisión Nacional de Energía (CNE), en el año 2005 la energía solar fotovoltaica no aparecía entre las fuentes de generación eléctrica del país, pero en 2014 ya representaba el 1% y para el año 2017 representaba el 7% de la generación eléctrica total en Chile.

De acuerdo al reporte de energía renovable no convencional (ERNC) del CNE (noviembre 2017), de los 6.186 GWh generados en octubre en Chile, 1.221 GWh son atribuibles a ERNC, de los cuales 420 GWh son por energía solar (34.4% de todas las renovables) (Comisión nacional de energía,2017). En el último anuario de estadísticas reportado por la CNE del año 2020, la energía solar representó el 12,7% del total de la capacidad de generación eléctrica bruta nacional, y representa el 47% de la generación eléctrica correspondiente

a las ERNC, atribuyéndose 7.994 GWh de los 17.010GWh inyectados por energía renovable no convencional al sistema (Comisión nacional de energía, 2020).

La energía solar es actualmente un tema de gran interés y la refrigeración es una aplicación particularmente atractiva debido a la coincidencia del pico de demanda de refrigeración y la disponibilidad de radiación. Una cámara de frío móvil alimentada con energía solar y con un grupo electrógeno de respaldo podría satisfacer la demanda de refrigeración en lugares donde el suministro de energía no es constante o que aún no tienen acceso a esta, mejorando la calidad de los productos alimenticios e impulsando el desarrollo de la industria agroalimentaria a través de la innovación tecnológica y un mejor desempeño ambiental.

### **1.5. Estado de arte de los sistemas de refrigeración solar.**

Los sistemas de refrigeración solar se clasifican en dos categorías. La primera categoría es un sistema de refrigeración térmica solar, donde un colector solar calienta directamente el refrigerante a través de tubos colectores en lugar de utilizar la energía eléctrica. La segunda categoría es un sistema de refrigeración de tipo FV, en el que la energía solar se convierte directamente en energía eléctrica y se utiliza para impulsar el sistema de refrigeración a través de una célula fotovoltaica (Ullah et al,2013). La celda fotovoltaica es un dispositivo semiconductor de estado sólido (muy parecido a un chip de ordenador) que convierte la energía de la luz en energía eléctrica (Otanicar et

al,2012). En el mercado se pueden encontrar celdas de silicio, celdas III-V, celdas de películas delgadas de calcogenuro, celdas fotoquímicas, y celdas de multiunión, con eficiencias de conversión de la energía solar a electricidad que varían de un 10% a 34%, dependiendo del tipo de celda (Sepúlveda, 2016).

Mientras que la salida de una célula fotovoltaica es típicamente electricidad de corriente continua (CC), la mayoría de los aparatos eléctricos domésticos e industriales utilizan corriente alterna (CA). Por lo tanto, un sistema completo de refrigeración FV consta típicamente de cuatro componentes básicos: módulos fotovoltaicos, una batería, un circuito inversor y una unidad de CA de compresión de vapor (Otanicar,2012).

- Los módulos fotovoltaicos: Las células FV producen electricidad convirtiendo la energía de la luz (del sol) en energía eléctrica de corriente continua (CC).
- La batería: La batería se utiliza para almacenar energía CC en un modo de carga cuando hay luz solar disponible y suministrar energía eléctrica de CC en un modo de descarga en ausencia de luz diurna. También puede manejar directamente los usos de CC tanto para los aparatos industriales como para los domésticos. Se puede utilizar un regulador de carga de la batería para proteger la batería de una sobrecarga.

- El inversor: El inversor es un dispositivo eléctrico que convierte la energía eléctrica de CC en CA y luego entrega la energía eléctrica a las cargas de CA.
- La unidad de compresión: La unidad de CA de compresión de vapor es en realidad un sistema de refrigeración convencional que funciona con la energía recibida del inversor [Otanicar et al, 2012).

Los sistemas fotovoltaicos se pueden clasificar en función de si están o no conectados a la red eléctrica convencional. Los sistemas fotovoltaicos autónomos son aquellos que están aislados de la red eléctrica y los sistemas fotovoltaicos conectados a la red son aquellos que están directamente conectados a la red eléctrica.

Es evidente que el consumo energético se produce independientemente de la radiación solar, es por ello que en algunos tipos de aplicaciones es necesario incluir un sistema de almacenamiento energético o de acumulación. En los sistemas FV autónomos la energía producida por los módulos FV se almacena en baterías. En otras aplicaciones, como el bombeo de agua o los sistemas conectados a red no se necesitan baterías, en el primer caso la energía se acumula en forma de energía hidráulica, mientras que en el segundo la energía se acumula en la propia red eléctrica (Abella,2005).

## 1.6. Antecedentes de sistemas de refrigeración solar.

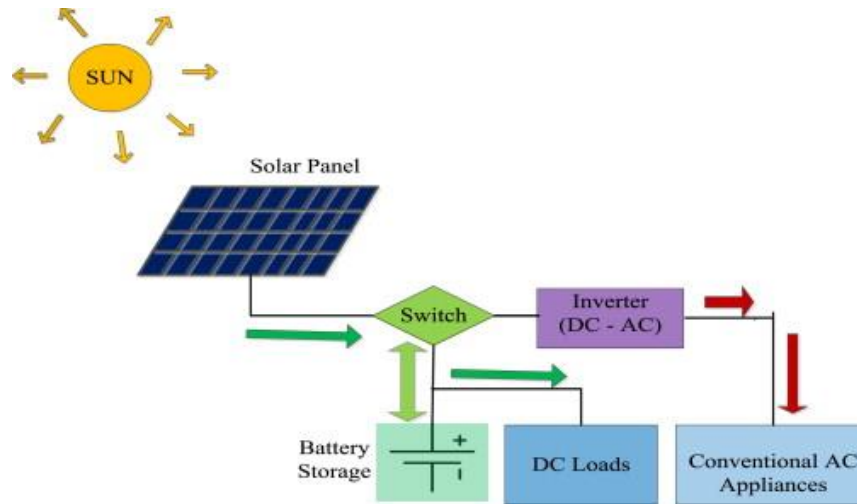


Figura 1: Diagrama esquemático de un sistema fotovoltaico autónomo  
Fuente: Otanicar et al. 2012.

Dentro de las primeras aplicaciones de la energía solar en sistemas de refrigeración de las que se tiene registro, Kattakayam en el año 1996 describe una fuente de energía autónoma para una unidad de refrigeración doméstica convencional con un volumen interno de 165 L que funciona con un campo de panel fotovoltaico respaldado por un grupo electrógeno. Para este sistema se utilizó ocho paneles fotovoltaicos, cada panel tiene 36 células circulares. Según las especificaciones del fabricante, bajo pruebas estándar del laboratorio las condiciones de voltaje de circuito abierto son de 21 V, la corriente de cortocircuito es de 2.4 A y el pico nominal de potencia es de 35 W. Los paneles fotovoltaicos cargan un campo de cuatro baterías tubulares de descarga profunda de plomo-ácido de 6V x 180 Ah conectadas en serie para dar un voltaje nominal de 24 V. Esta elección se hace, en lugar de la operación

a 12 V, para reducir las magnitudes de las corrientes CC manejadas por el inversor (Kattakayam y Srinivasan,1996).

Chen et al. Estudió un sistema de aire acondicionado solar impulsado directamente por un sistema fotovoltaico autónomo. Para ello construyó y probó seis aires acondicionados con diferentes tamaños de paneles fotovoltaicos y aires acondicionados en el exterior para investigar experimentalmente las probabilidades de funcionamiento en diferentes irradiaciones solares, y se demostró que la probabilidad de funcionamiento instantáneo (OPB) y la fracción de tiempo de funcionamiento ( $R_f$ ) del aire acondicionado se ven afectadas principalmente por parámetro de diseño  $r_{pl}$  (relación entre la potencia fotovoltaica máxima y la potencia de carga). Debido a que el sistema es autónomo y requiere un suministro de energía constante al compresor, se utilizó una pequeña batería, llamada batería tampón, que actúa como un amortiguador para estabilizar el funcionamiento del compresor. Se conectó un condensador a la batería para suprimir la sobrecarga de energía en el arranque del compresor y un controlador basado en un microprocesador con medidas de corriente de carga/descarga, voltaje, radiación solar, etc. Para controlar la carga/descarga y el registro de datos. El diseño del sistema no utilizó el MPPT (control de seguimiento de máxima potencia) para el seguimiento de la potencia máxima del módulo fotovoltaico, sino que se basó en el nMPPO (funcionamiento en el punto de máxima potencia) que hace coincidir el rendimiento de los módulos fotovoltaicos solares con el voltaje de

baterías y evita la pérdida de energía del MPPT reduciendo el coste y manteniendo la fiabilidad (Huang et al, 2009)

Modi y et al. Rediseñó un refrigerador eléctrico doméstico de 165 L en uno que funciona con energía solar, añadiendo un banco de baterías, un inversor y un transformador. En este trabajo utilizaron una capacidad fotovoltaica de 140 W y dos bancos de baterías de 12 V y 135 Ah, esta es la menor configuración posible requerida para que este sistema funcione correctamente en condiciones normales (Modi et al,2009)

Gupta et al realizaron un estudio paramétrico con el software TRNSYS utilizando los datos meteorológicos de la ciudad de Jaipur (India), con el fin de lograr el mejor arreglo fotovoltaico para impulsar un refrigerador domestico de manera que este fuera autónomo. El sistema consistía en un refrigerador con una capacidad de 50 L, un banco de baterías de 24 V, un inversor de 1 kVA y paneles FV con un controlador de carga. Los resultados concluyeron que es factible hacer funcionar un refrigerador con aislamiento térmico de 25 mm de espesor, paneles de 320 W y con una capacidad de batería de 50 Ah, al aumentar el espesor de asilamiento a 50 mm, la capacidad de los paneles de 200 W es suficiente para hacer funcionar el refrigerador sin energía de la red (Gupta el al, 2014)

Salilih et al. Propone un método para el análisis y la simulación de un sistema de refrigeración por compresión de vapor impulsado por energía solar, en este

estudio se considera un compresor de velocidad variable en condiciones meteorológicas específicas. La velocidad de funcionamiento del compresor se determina para modelar la variación horaria del rendimiento del sistema de refrigeración (Salilih y Birhane, 2019)

Se han realizado numerosas investigaciones sobre los sistemas de refrigeración domésticos solar fotovoltaico, sin embargo, el volumen de refrigeración es reducido y solo garantizan almacenamiento en un lugar específico. La cámara de frío FV móvil puede cumplir con más requerimientos de la cadena de frío, al ser movable puede almacenar el producto inmediatamente después de la producción, y conservar este en un intervalo de temperaturas controlado, garantizando 3 de las 4 etapas de la cadena de frío en la industria alimentaria, producción, transporte, almacenamiento y venta (Ullah et al, 2013).

En este trabajo se evalúa el comportamiento térmico y energético de un sistema de refrigeración móvil de 12 m<sup>3</sup> alimentado por energía solar fotovoltaica, el cual busca satisfacer la demanda de sistemas de refrigeración autónomos y fiables que puedan cumplir con los requerimientos del mercado. Para esto se dispondrá de un sistema de adquisición de datos instalado en una cámara de refrigeración la que estará alimentada con energía solar a través de 4 módulos fotovoltaicos, conectados a un regulador de carga el cual se encargará del estado de carga de un banco de 4 baterías los cuales a través de un inversor alimentaran la cámara.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo general**

Evaluar la demanda energética de una cámara frigorífica móvil alimentado con un sistema de generación solar fotovoltaico autónomo en función de la variación de la temperatura interna.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Identificar las variables a medir en la cámara de frío que describan el comportamiento térmico y la demanda de potencia eléctrica.
- Implementar el sistema de adquisición de datos encargado de registrar las variables de interés.
- Analizar el registro de los datos de las variables seleccionadas, en diferentes condiciones de funcionamiento de la cámara.

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. Sistema de refrigeración fotovoltaico

La cámara móvil de refrigeración alimentada con energía fotovoltaica se encuentra situada en la XVI Región de Ñuble, Comuna de Coihueco, a 18 km de la Ciudad de Chillán hacia la cordillera en el fundo Santa Elena, como se muestra en la Figura 2, donde está siendo utilizada para almacenar y conservar productos agrícolas de la zona, en este lugar se evaluará los límites de operación de la cámara bajo condiciones ambientales locales.



Figura 2. Ubicación de la cámara de frío, XVI Región de Ñuble, Comuna de Coihueco.

La cámara móvil opera con un sistema convencional de refrigeración por compresión de vapor, utilizando para su funcionamiento un compresor de la marca Embraco de 1 hp de potencia tal como el que se muestra en la figura 1.



Figura 3. Compresor hermético pistón Embraco

El ciclo de refrigeración por compresión de vapor es el más utilizado en refrigeración y su funcionamiento se basa en el ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor, el cual se compone de cuatro procesos (Cengel y Boles, 2009).

Como se muestra en la figura 4, en un ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor, el refrigerante entra al compresor en el estado 1 como vapor saturado y se comprime isoentrópicamente hasta la presión del condensador. La temperatura del refrigerante aumenta durante el proceso de compresión, hasta una temperatura bastante superior al ambiente. Luego el refrigerante ingresa al condensador como vapor sobrecalentado en el estado 2 y sale como líquido saturado en el estado 3, como resultado del rechazo de

calor hacia los alrededores. El refrigerante en estado líquido saturado se estrangula hasta la presión del evaporador al pasarlo por una válvula de expansión o por un tubo capilar. La temperatura del refrigerante desciende por debajo de la temperatura del espacio refrigerado durante este proceso. El refrigerante entra al evaporador en el estado 4 como un vapor húmedo de baja calidad, y se evapora por completo absorbiendo calor del espacio refrigerado. El refrigerante sale del evaporador como vapor saturado y vuelve a entrar al compresor, completando el ciclo. El ciclo real refrigeración por compresión de vapor difiere del ideal principalmente debido a dos fuentes comunes de irreversibilidad; la fricción del fluido que causa caídas de presión y la transferencia de calor hacia o desde el ambiente (Cengel y boles, 2009)

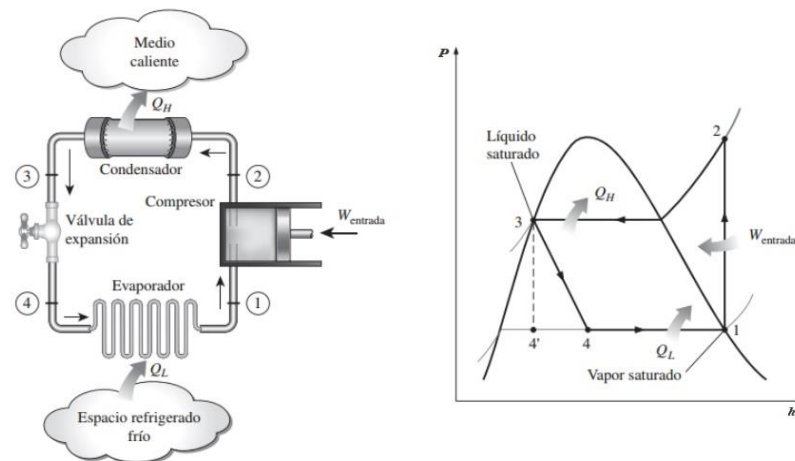


Figura 4. Esquema y diagrama P-h para el ciclo ideal de refrigeración por Compresión de vapor.

Fuente: Cengel y boles, 2009.

El suministro de energía para este sistema estará dado por 4 módulos fotovoltaicos de 72 células policristalinas, alcanzando cada módulo una potencia de hasta 320 W, potencia máxima de voltaje de 37,4 V y 8,56 A de corriente. El voltaje de circuito abierto ( $V_{OC}$ ) es de 46,4 V y la corriente de cortocircuito ( $I_{SC}$ ) es de 9,05 A. Los módulos estarán conectados dos en serie y dos en paralelo, entregando al sistema un voltaje nominal de 92,8 V y una corriente de 18,1 A.

Los paneles solares se conectarán a un regulador de carga MPPT que soporta un voltaje máximo de 150 V y una corriente de 60 A, el cual a su vez estará conectada a un banco de 4 baterías de 200 Ah y 12 V cada una, en conexión serie, entregando 48 V y 200 Ah. Este acumulador electroquímico entregará energía CC la cual será convertida a corriente CA por un inversor modelo multiplus II de 3000 W, para así satisfacer la demanda de energía del compresor de la cámara de frío, tal como se muestra en la Figura 5.

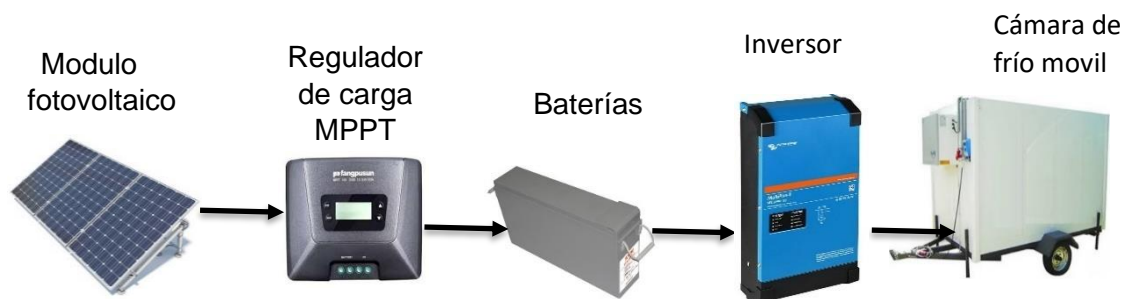


Figura 5. Cámara de frío móvil alimentada con energía solar fotovoltaica.

### **Demanda de potencia eléctrica.**

La demanda de potencia dependerá de las condiciones ambientales, de operación, las dimensiones y características de ensamblaje de la cámara de frío. Para esto se debe considerar que en la cámara de frío se almacena la fruta recolectada durante la mañana hasta el mediodía. Después del almacenamiento, la cámara de frío permanece cerrada hasta el día siguiente cuando es despachada la carga.

La cámara mide 2 m de ancho, 3 m de largo y 2 m de alto, el material de aislación es poliuretano inyectado de densidad  $40 \text{ kg m}^{-3}$  y está ubicada a la intemperie en un predio plantado con cerezas como se muestra en la figura 6. Debido a que la cámara permanece cerrada la mayor parte del tiempo, el flujo de calor predominante ingresa a través de las paredes además del almacenamiento de frutas denominado carga de género. Durante las horas de mayor radiación el compresor funciona directamente con la energía generada por los paneles fotovoltaicos, a medida que la radiación disminuye las baterías comienzan a aportar energía y en la noche la energía proviene exclusivamente de este grupo electrógeno.



Figura 6. Cámara de frío fotovoltaica utilizada para almacenar y conservar Cerezas en XVI Región de Ñuble, Comuna de Coihueco.

Considerando los flujos térmicos o calor que entra en el espacio a refrigerar se considerarán variables como las temperaturas externas, temperaturas internas, variación de la temperatura de ajuste, demanda y consumo de potencia.

El ingreso de productos a la cámara genera pérdidas térmicas denominadas “perdida por carga de género”<sup>1</sup> (Devesa y Sellés), es por esto que se someterá a la cámara de frío a una carga de agua de 300 L a 29°C por 18 horas, a través de este hito se podrá analizar el consumo y la potencia demanda por la cámara para alcanzar la temperatura de ajuste.

### **Potencia de un sistema de refrigeración por compresión a vapor.**

Los valores de potencia obtenidos en esta investigación se recogieron de un sistema de adquisición de datos asociados a un potenciómetro, el cual mide y

registra la potencia demandada por los ventiladores y un compresor de 1hp instalado en la cámara, este último hace circular un refrigerante del tipo 404a.

### 3.2. Sistema de adquisición de datos

El Sistema de medición entregó las variables necesarias para evaluar el comportamiento de la cámara de frío en condiciones específicas, para esto se utilizó equipos con alta precisión para medir y registrar parámetros como la temperatura exterior e interior de la cámara. Asimismo, se midió y registró datos del flujo de potencia en corriente alterna del compresor, ya que además de ser fundamental en el sistema de refrigeración, también es responsable de gran parte del consumo energético.

Para almacenar los datos de las mediciones de temperatura ambiente se utilizó un datalogger modelo Em5b como el que se muestra en la figura 7, a este se conectó un sensor de temperatura modelo RT-1 para medir temperatura externa. El sensor RT-1 se ubicó bajo los paneles fotovoltaicos, en el exterior de la cámara.



Figura 7. Datalogger modelo Em5b

Para medir temperatura interna y humedad relativa se utilizó un datalogger marca Extech, el cual recogió los datos vía USB, como el que se muestra en la figura 8. Este sensor se situó en el interior de la cámara junto al evaporador.



Figura 8. Registrador de humedad/temperatura USB modelo RHT.

Para medir el flujo de potencia eléctrica se utilizó un medidor y analizador de potencia portátil Hioki, como el que se muestra en la figura 9. Este dispositivo se ubicó en la alimentación eléctrica del compresor, donde monitoreó y registró datos de voltaje, corriente, además de interrupciones instantáneas, caídas de voltaje y fluctuaciones de frecuencia.



Figura 9. Analizador de calidad de potencia HIOKI PQ3100

Los datos de temperatura ambiente que se obtuvieron y almacenaron con el sensor RT-1 y datalogger Em5b respectivamente, fueron configurados con el

software de manejo de datos ECH<sub>2</sub>O system, el cual nos permitió asignar un nombre al datalogger, fecha, hora e intervalo de mediciones requeridos, especificar los sensores conectados a cada uno de los puertos y descargar los datos calibrados y sin procesar a Ms Excel como se muestra en la figura 10.

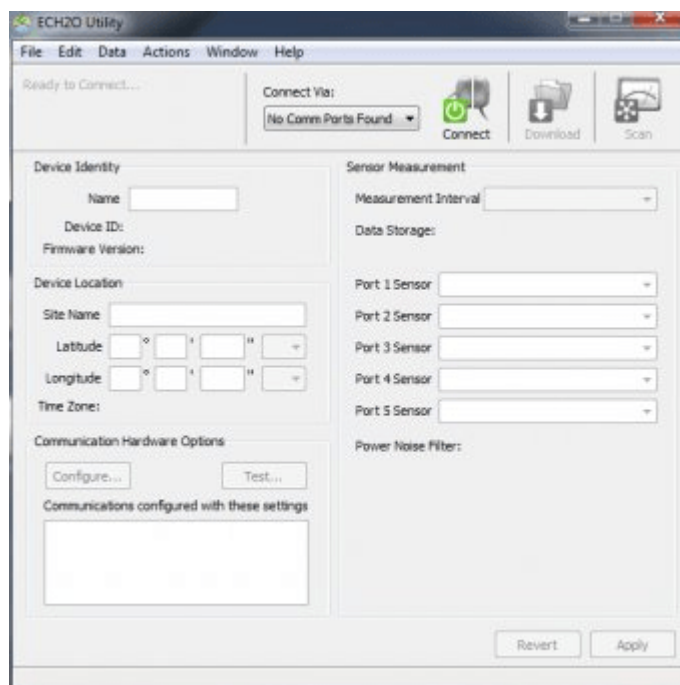


Figura 10. Ventana del programa para el manejo de datos ECH<sub>2</sub>O Utility

Los datos obtenidos de temperatura interna de la cámara por el registrador RTH 10 se procesaron a través de un programa que trae el dispositivo de manera predeterminada. Una vez conectado el dispositivo USB e instalado el programa se configuró para hacer las mediciones en función de los requerimientos de la investigación a través de la siguiente ventana de configuración:

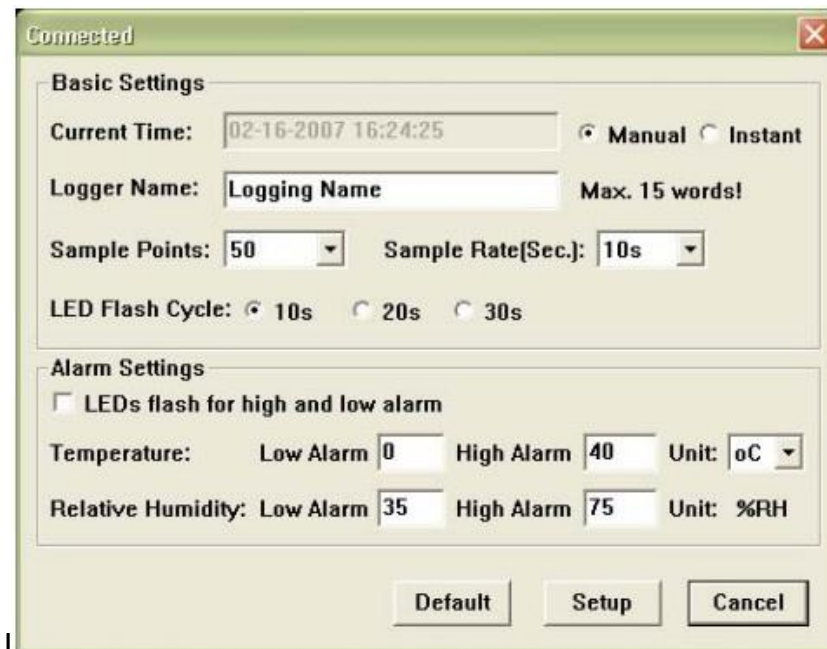


Figura 11. Menú desplegable del software graficador del datalogger RHT 10.

A través de este software se logró definir la cantidad de lecturas y la tasa de muestreo para cada una de estas

El análisis de datos para el consumo energético del sistema de refrigeración se hizo a través del software PQ ONE compatible con el analizador PQ3100, este proporciona una visualización y análisis de los datos medidos.

### 3.3. Registro de los datos de interés seleccionados

Para la determinación y recogida de datos a través del analizador de potencia Hioki, se configuró una tasa de muestro de 15 segundos, debido a que el funcionamiento del compresor y ventiladores presentan ciclos de trabajo cortos e intermitentes, obteniendo 5762 mediciones por día, así se logró obtener una

cantidad de datos significativos, los cuales permitieron interpretar y visualizar de manera clara la demanda de potencia y funcionamiento de los equipos.

Para el registro de las temperaturas externas e internas obtenidas por el colector de datos modelo Em5b y el datalogger marca Extech respectivamente, se determinó una tasa de muestro de 5 minutos para la primera y de 1 minuto para la segunda, debido a las limitaciones de almacenamiento y a que la temperatura ambiente varía más lento que la temperatura interna, registrándose en esta última constantes pulsaciones generadas por los ciclos de trabajo del compresor, oscilando en valores cercanos a la temperatura de ajuste del termostato.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El día 19 de enero de 2021 se realizó una prueba de carga de 300 L de agua en la cámara de refrigeración, en dos estanques de 120 L y uno de 60 L a una temperatura de 29°C. Tal como lo muestra la figura 2, el trabajo del compresor comenzó a las 16:15 h y se extendió hasta las 17:33 h, trabajando de manera continua durante una hora y dieciocho minutos. En este tiempo consumió 1,67 kWh de energía. A partir de este punto comenzaron ciclos de trabajo de menor duración, a medida que la carga térmica alcanzó la temperatura de referencia de 11°C programada en el termostato.

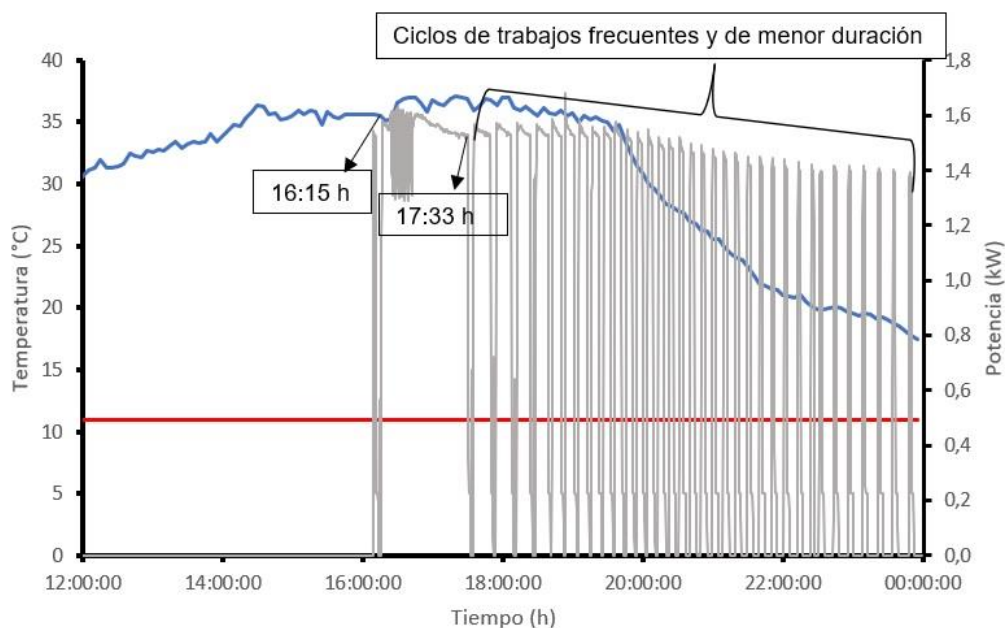


Figura 12. Arranque del compresor con 300 L de agua en la cámara ubicada en XVI Región de Ñuble, Comuna de Coihueco.

La temperatura ambiente máxima que se registró fue de 37°C y la mínima de 12,8°C. Debido a que la temperatura ambiente en la noche fue mayor a la de referencia, el compresor se mantuvo trabajando. No obstante, el intervalo de trabajo fue mucho menor que el intervalo de reposo, llegando a valores de hasta 5 minutos y 10 minutos respectivamente. La energía total consumida fue de 8,05 kWh, de los cuales 6,5 kWh se consumieron de día y 1,55 kWh durante la noche.

El día 27 de enero la temperatura de referencia es de 11°C al igual que el día 19 y la temperatura exterior alcanzó el valor más bajo durante la prueba, llegando a un valor de 6,4°C. La demanda de potencia tiene estrecha relación con la temperatura externa, cuando esta se incrementó durante el día también lo hizo el consumo de energía, aumentando los ciclos de trabajo, alcanzando valores de consumo de potencia de hasta 1,48 kW como se muestra en la figura 13.

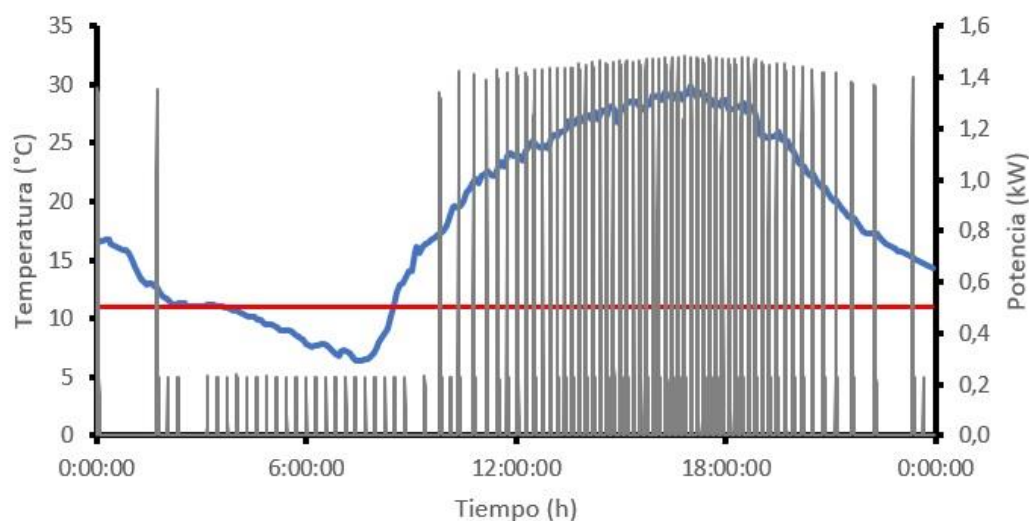


Figura 13. Temperatura externa y demanda de potencia en función del tiempo para el día 27 de enero en XVI Región de Ñuble, Comuna de Coihueco.

El día 24 de enero la temperatura se fijó una temperatura de referencia de 15°C, siendo esta la más alta de las cuales se tienen datos durante la prueba. Debido que este valor es superior a la temperatura ambiente durante las primeras horas del día, predominaron los ciclos de reposo considerablemente por sobre los de trabajo tal como lo muestra la figura 14.

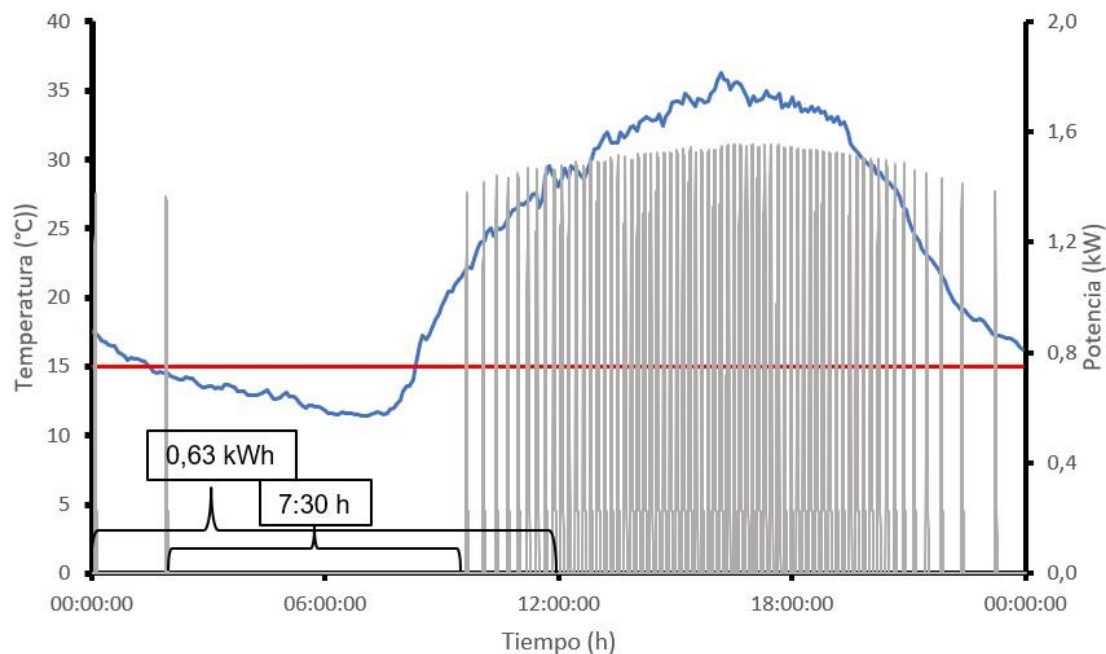


Figura 14. Temperatura externa y potencia consumida en función del tiempo para el día 24 de enero en XVI Región de Ñuble, Comuna de Coihueco.

El Ciclo de trabajo de los ventiladores y el compresor comenzaron a las 9:30:00 h alcanzando un valor en ese punto de 1,33 kW de demanda de potencia. La energía consumida durante las primeras doce horas del día 24 de enero fue de 0,63 kWh, este valor representa los prolongados ciclos de reposo mencionado anteriormente en contraste con las siguientes doce horas donde el valor de consumo energético aumentó considerablemente, siendo este 4,06 kWh debido a las elevadas temperaturas ambientales, las cuales alcanzaron un máximo de 36,3°.

La temperatura interna de la cámara se mantuvo fluctuando entre los 15°C, variando en menos de un grado Celsius durante todo el día como se muestra en la figura 15.

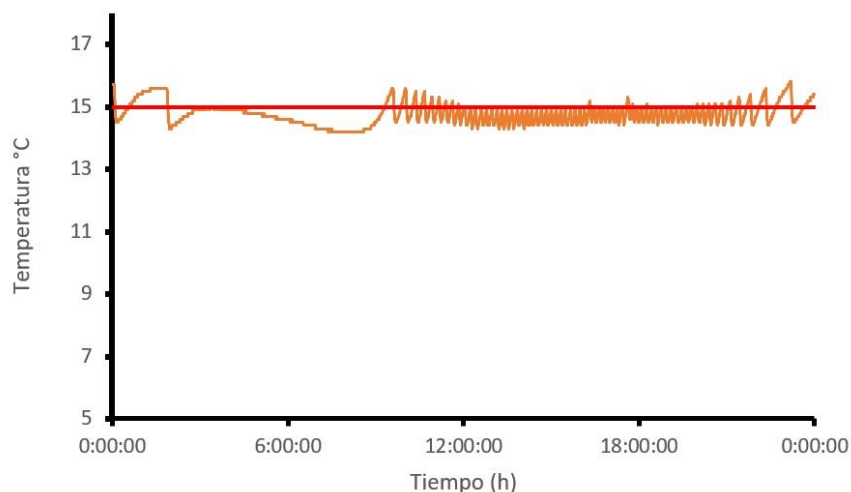


Figura 15. Temperatura interna en función del tiempo para el día 24 de enero en XVI Región de Ñuble, Comuna de Coihueco.

El día 3 de febrero las temperaturas ambientales fueron similares al del día 24 de enero, sin embargo, se ajustó la temperatura a 9°C. Debido a que la temperatura exterior fue superior las primeras seis horas del día, se mantuvo un ciclo de trabajo constante, y por ende un mayor consumo de energía.

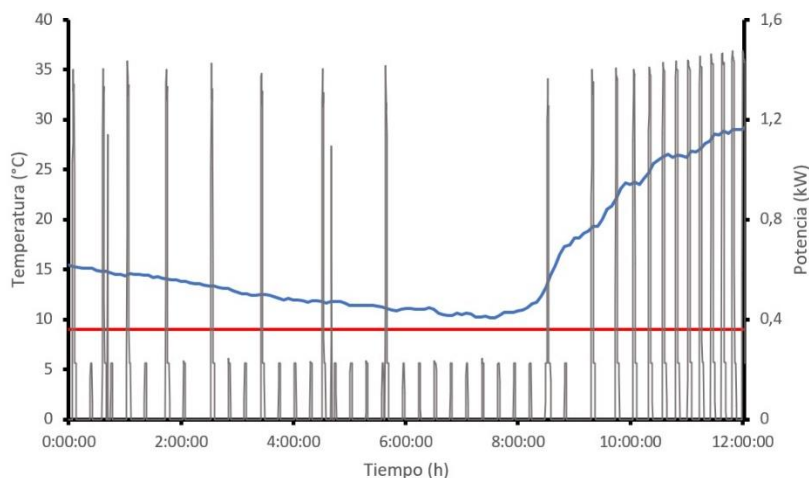


Figura 16. Temperatura exterior y potencia del compresor en función del tiempo para el día 3 de febrero en XVI Región de Ñuble, Comuna de Coihueco.

Las primeras doce horas del día se demandaron 1,9 kWh, si se compara con el día 24 de enero donde la temperatura de referencia fue de 15°C, se consumieron 1,27 kWh más el día 24 en el mismo horario.

En la figura 16 se pueden apreciar picos potencia que llegan a valores de 0,25 kW. Estas mediciones corresponden a ventiladores instalados en interior de la cámara de frío los cuales tuvieron ciclos de trabajo y reposo de 2 y 14 minutos respectivamente. Cabe destacar que la temperatura interna de la cámara el

día 3 de enero no alcanzó a llegar a la temperatura de referencia, siendo la mínima temperatura registrada de 10,2 °C.

El día 4 de febrero se registró la mayor temperatura ambiente alcanzando un valor de 38°C, además durante el proceso de operación de la cámara se cambió la temperatura de referencia de 9°C a 7°C a las 10:35:00, este cambio de temperatura se puede apreciar en la figura 17.

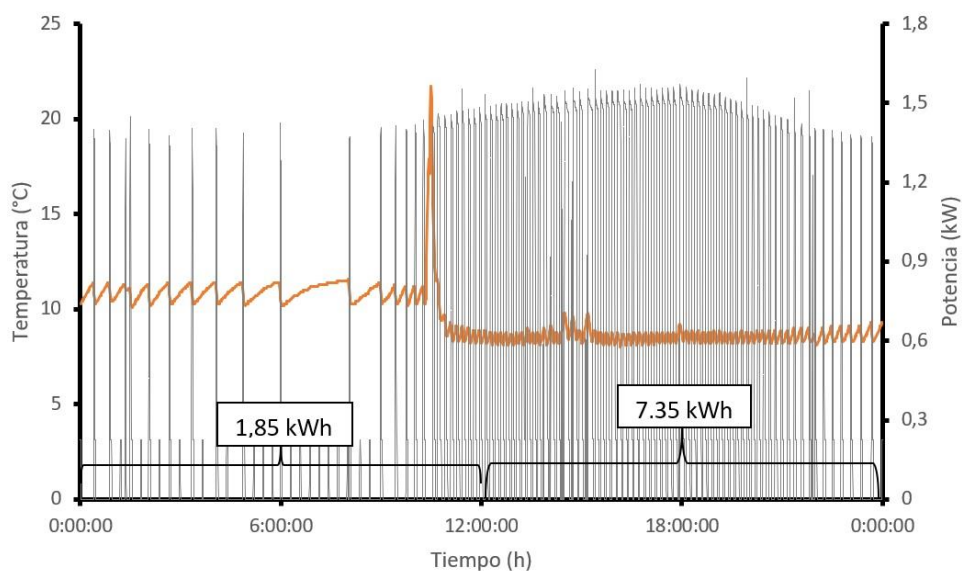


Figura 17. Temperatura interna de la cámara y potencia consumida en función del tiempo para el día 4 de febrero en XVI Región de Ñuble, Comuna de Coihueco.

La demanda de potencia aumentó debido a la disminución de la temperatura de referencia y el aumento de la temperatura exterior, por lo que hubo una mayor transferencia de calor hacia la cámara y mayor trabajo del compresor para lograr ajustar la temperatura interna a la de referencia, aumentando los ciclos de trabajo y disminuyendo los de reposo con valores de 7 y 2 minutos

respectivamente después de las 15:00:00 horas tal como se aprecia en la figura 17.

El consumo total de energía durante el día 4 de febrero es de 9,19 kWh, el consumo más alto registrado durante el periodo de estudio del sistema de refrigeración FV.

El día 5 de febrero la temperatura de referencia que se programó en el termostato fue de 7°C, la mínima temperatura ajustada durante el periodo de estudio. Según se puede apreciar en la figura 18, no se alcanzó la temperatura de referencia durante todo el día, siendo la mínima registrada de 8°C y la máxima de 9,4 °C. El consumo total de energía fue de 5,7 kWh.

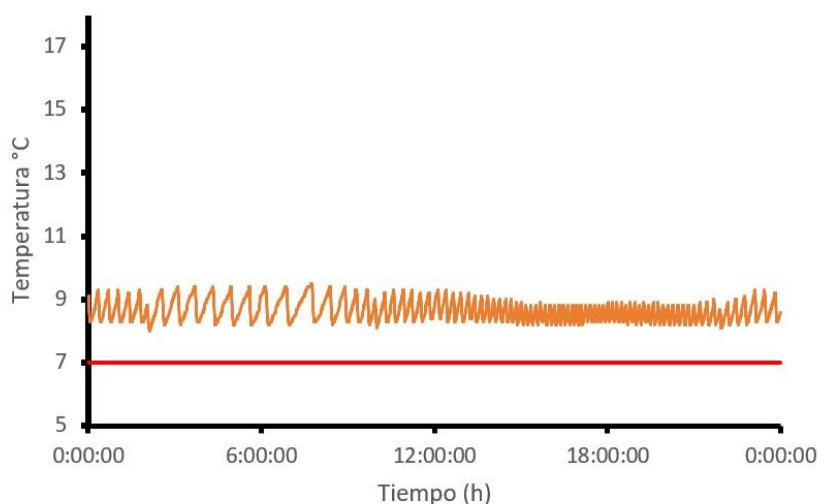


Figura 18. Temperatura interna en función del tiempo para el día 5 de Febrero en XVI Región de Ñuble, Comuna de Coihueco.

La precisión del registro de la temperatura interna el día 5 de febrero pudo verse afectada por la ubicación del sensor que utilizó el controlador del compresor para ajustar la temperatura interna y la ubicación del sensor de temperatura interna RHT, De encontrarse el sensor del controlador en una zona más fría cerca el evaporador, el compresor no aumentaría la demanda de potencia para enfriar la cámara, registrándose temperaturas levemente más altas según la ubicación del sensor RHT.

El día 24 de enero se ajustó el termostato a una temperatura de 15°C, registrándose una temperatura interna máxima de 15,7 °C y una mínima de 14,3 °C. a diferencia del día 5 de febrero, la temperatura se mantuvo fluctuando en menos de 1° C entorno a la temperatura de referencia, y el consumo fue de 1kWh menos, siendo el consumo total de energía de 5,7 kWh.

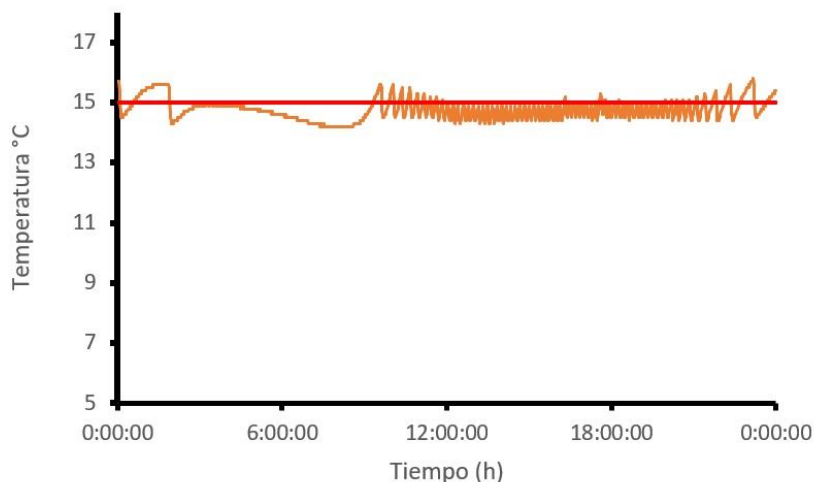


Figura 19. Temperatura interna en función del tiempo para el día 24 de enero en XVI Región de Ñuble, Comuna de Coihueco.

La figura 20 muestra las máximas temperaturas desde el día 9 al 17 de febrero, a una temperatura de ajuste constante de 13°C, en función de la energía consumida cada día. Se puede apreciar que hubo una tendencia polinómica. A medida que las temperaturas máximas aumentan también aumenta proporcionalmente la energía demandada cada día.

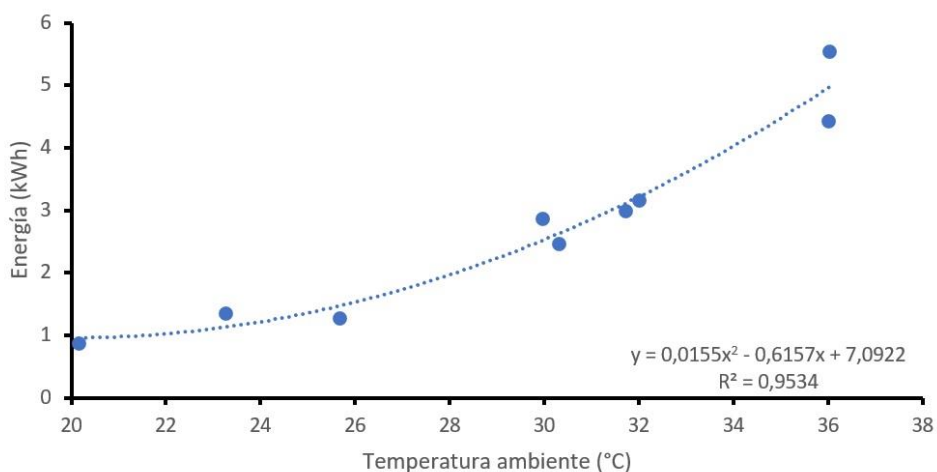


Figura 20. Consumo de energía en función de la temperatura máxima en XVI Región de Ñuble, Comuna de Coihueco.

La figura 21 muestra las temperaturas de referencias variando desde el día 24 de enero al 8 de febrero desde 7°C a 15°C en función del consumo de energía. Los cuadros de texto indican el rango de temperaturas máximas que se registraron con respecto a cada temperatura de ajuste. El máximo consumo

se alcanzó a una temperatura máxima de 38°C, alcanzando un valor sobre los 9 kWh en 7°C de ajuste.

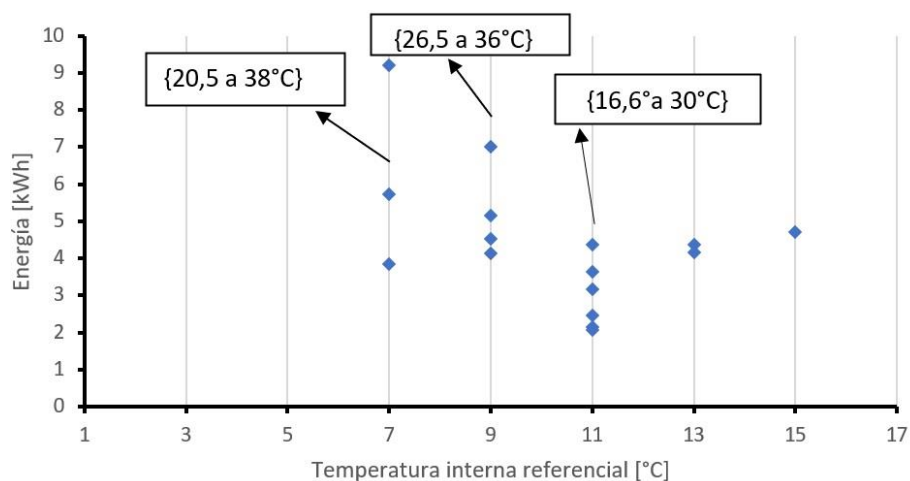


Figura 21. Consumo de energía en función de la temperatura de referencia en XVI Región de Ñuble, Comuna de Coihueco.

Para un ajuste de temperatura de 9°C, el consumo fluctuó entre los 4,15 kWh y 7,01 kWh. Desde los 11°C a 15 °C de referencia, el consumo de energía llegó a un máximo de 4,7 kWh con temperaturas máximas que variaron desde los 31°C a 36°C a temperaturas de ajuste de 13°C y 15°C respectivamente.

## 5. CONCLUSIONES

Para una cámara de refrigeración móvil alimentada desde paneles fotovoltaicos, la cual fue sometida a una prueba de carga y mantenimiento de la temperatura en la Comuna de Coihueco, región de Ñuble, los principales parámetros utilizados para describir y modelar el funcionamiento de la cámara fueron potencia, energía acumulada, temperatura externa e interna. Estas variables nos permitieron explicar el comportamiento térmico y demanda de potencia de la cámara en función del tiempo de operación de la misma.

La implementación del sistema de adquisición datos se logró a través de los softwares asociados a cada uno de los equipos los cuales permitieron programar fechas, cantidad de datos muestreados e intervalos de mediciones, demostrando la fiabilidad de los datos obtenidos, siendo los errores identificados en la recolección de datos de carácter humano y no propio del software.

De los datos obtenidos de la prueba de carga se evidenció un mayor consumo de energía, con amplios intervalos de funcionamiento que se van reducción a medida que se alcanza la temperatura de referencia. La demanda de energía en el ciclo de carga fue de 8,05 kWh donde solo un 17% de la energía se

consumió durante la noche y por lo tanto proviene exclusivamente desde las baterías.

Las temperaturas más altas ajustadas en el termostato demandaron menos energía que las más bajas, por lo que, al ser la temperatura de ajuste superior a la externa, el compresor solo se encarga de retirar el calor residual que hay dentro de la cámara para alcanzar la temperatura de ajuste, realizando transferencia de calor desde la cámara hacia el ambiente, funcionando en esas circunstancias solo los ventiladores. Esta condición ocurrió frecuentemente en horas de la mañana, cuando la temperatura exterior es baja. A medida que la temperatura externa aumenta y alcanza la temperatura de ajuste, comenzaron ciclos de trabajos de mayor potencia, aumentando la frecuencia de los mismos y disminuyendo los periodos de reposo.

Las temperaturas de ajuste más bajas demandaron mayor energía, alcanzando el máximo valor de consumo en el menor ajuste realizado en el periodo de estudio. Esto debido a que el compresor debió realizar mayor trabajo para extraer el calor de la cámara y alcanzar el punto de ajuste, siendo más notorio el aumento de demanda de energía cuando las temperaturas exteriores alcanzaron sus máximos valores.

Las temperaturas máximas tienen estrecha relación con el consumo de energía. A medida que estas aumentan, también lo hace la demanda de energía, el modelo de crecimiento de ambas es proporcional y describe una curva cuadrática.

Bajo las condiciones locales de operación, se demuestra que los límites de operación de la cámara van desde la temperatura de referencia de 7°C, este límite se observa cuando la temperatura externa alcanzó un máximo de 38°C y una mínima interna de 8°C. Temperaturas de ajuste menores aumentaron la demanda de energía por lo que se requiere un arreglo fotovoltaico de mayores dimensiones para aumentar la energía generada para extraer de manera más eficiente el calor de la cámara.

Debido a que las máximas potencias registradas fueron cuando la temperatura exterior eran las más altas, se sugiere un material de aislación de la cámara con un coeficiente de transmisión menor, para así disminuir el traspaso por conducción a través de las paredes de la cámara. Logrando mantener las temperaturas más bajas durante las horas de mayor radiación demandando menos energía, utilizando el exceso para cargar las baterías que mantendrán la temperatura de ajuste durante la noche. La mantención de los paneles solares mantendrá una mejor eficiencia de los mismos, y por ende un mayor flujo de energía hacia el compresor, evitando sobrecalentamientos y caídas de potencias.

## 6. LITERATURA CITADA

1. Abellá, M.A. 2005. Sistemas fotovoltaicos: introducción al diseño y dimensionado de instalaciones de energía solar fotovoltaicas. (2a. ed.). Sociedad Anónima de Publicaciones Técnicas. Madrid, España.
2. CNE (Chile). 2015. Reporte mensual sector energético. Volumen N°3. Comisión Nacional de Energía. CNE. Santiago, Chile.
3. CNE (Chile). 2021. Anuario estadístico de energía. Comisión Nacional de Energía. CNE. Santiago, Chile.
4. Çengel, Y.A., M.A. Boles. 2011. Termodinámica. (7a. ed.). McGraw-Hill. México D.F., México
5. Devesa, M., V. Sellés. 2017. Balance térmico de una instalación frigorífica [en línea]. Academia. <[https://www.academia.edu/11858200/TermodinamicaBALANCE\\_TERMICO?auto=download](https://www.academia.edu/11858200/TermodinamicaBALANCE_TERMICO?auto=download)>. [Consulta: 23 septiembre 2021].
6. Gupta, B.L., M. Bhatnagar and J. Mathur. 2014. Optimum sizing of PV panel, battery capacity and insulation thickness for a photovoltaic operated domestic refrigerator. Sustain. Energy Technol. Asses. 7: 55-67.
7. Huang, B.-J., T.-F. Hou, P.-C. Hsu, T.-H. Lin, Y.-T. Chen, C.-W. Chen, K. Li and K.Y. Lee. 2015. Design of direct solar PV driven air conditioner. Renew. Energy 88: 95-101.
8. Kattakayam, T.A., K. Srinivasan. 1996. Photovoltaic panel-generator based autonomous power source for small refrigeration units. Solar Energy 56(6): 543-552.
9. Lapuerta, M., O. Armas. 2012. Frío industrial y aire acondicionado. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Castilla-La Mancha. Ciudad Real, España.

10. Modi, A., A. Chaudhuri, B. Vijay and J. Mathur. 2009. Performance analysis of a solar photovoltaic operated domestic refrigerator. *Appl. Energy* 86(12): 2583-2591.
11. Otanicar, T., R.A. Taylor and P.E. Phelan. 2012. Prospects for solar cooling - An economic and environmental assessment. *Solar Energy* 86(5): 1287–1299.
12. Parra, A. 2007. Técnicas de almacenamiento y conservación de frutas y hortalizas. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Bogotá, Colombia.
13. Salilih, E.M., Y.T. Birhane. 2019. Modelling and performance analysis of directly coupled vapor compression solar refrigeration system. *Solar Energy* 190: 228–238.
14. Sarbu, I., C. Sebarchievici. 2015. General review of solar-powered closed sorption refrigeration systems. *Energy Convers. Manag.* 105: 403–422.
15. Sepúlveda, C.A. 2016. Simulación dinámica de un sistema de refrigeración termo solar para la conservación de frutas. Tesis, Doctor en Ingeniería Agrícola con mención en Recursos Hídricos en la Agricultura. Universidad de Concepción, Dirección de Postgrado, Facultad de Ingeniería Agrícola. Chillán, Chile.
16. Ullah, K.R., R. Saidur, H.W. Ping, R.K. Akikur and N.H. Shuvo. 2013. A review of solar thermal refrigeration and cooling methods. *Renew. Sustain Energy Rev.* 24: 499–513.
17. Villalobos, P., A. Rojas y M. Leoparati. 2006. Chile potencia alimentaria: compromiso con la nutrición y salud de la población. *Rev. Chil. Nutr.* 33(Supl. 1): 232-237.