

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

### **OPTIMIZACIÓN DE EQUIPOS TÉRMICOS Y TERMODINÁMICOS CON ENFOQUE MECATRÓNICO**

#### **OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO TÉRMICO Y TERMODINÁMICO QUE SE DESARROLLA EN UN REFRIGERADOR SOLAR PARA LA PARROQUIA DE LLOA.**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO  
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO  
MECÁNICO**

**JUAN DANIEL UNDA TOASA**

**juan.unda@epn.edu.ec**

**DIRECTOR: PhD. ÁLVARO GONZALO XAVIER AGUINAGA BARRAGÁN**

**alvaro.aguinaga@epn.edu.ec**

**DMQ, febrero 2022**

## CERTIFICACIONES

Yo, JUAN DANIEL UNDA TOASA declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



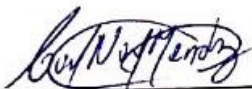
JUAN DANIEL UNDA TOASA

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por JUAN DANIEL UNDA TOASA, bajo mi supervisión.



ALVARO XAVIER AGUINAGA BARRAGÁN  
DIRECTOR

Certificamos que revisamos el presente trabajo de integración curricular.



CARLOS ANDRÈS NARANJO  
MENDOZA\_REVISOR 1 DEL  
TRABAJO DE INTEGRACIÓN  
CURRICULAR



EDGAR HERNÁN CANDO NARVAÉZ  
\_REVISOR 2 DEL TRABAJO DE  
INTEGRACIÓN CURRICULAR

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.



---

**Juan Daniel Unda Toasa**



---

**Ing. Álvaro Gonzalo Xavier Aguinaga Barragán, PhD.**

**DIRECTOR**

## DEDICATORIA

El presente trabajo se lo dedico a mis padres, Julio Unda y Yolanda Toasa, quienes, a pesar de las adversidades, nunca se rindieron, e inculcaron aquellos valores fundamentales para mi desarrollo personal, académico y profesional.

A mis hermanos Cristian, Viviana y Luis, por siempre demostrar su apoyo en los momentos más necesarios y brindarme su consideración.

A mi tío, Cesar Toasa, quien me dedico su tiempo y me enseñó las virtudes para ser una mejor persona, y mostrarme el valor del trabajo honesto.

A mi tía, Cecilia Toasa y sus hijos, porque a pesar de la distancia me brindo su cariño y apoyo incondicional.

Juan D. Unda T.

## **AGRADECIMIENTO**

Primeramente, agradezco a mis padres y hermanos por siempre ser un pilar fundamental para mi crecimiento personal, por inculcarme el valor de trabajo y responsabilidad, además de brindarme su afecto incondicional.

A la Escuela Politécnica Nacional le agradezco por brindarme la oportunidad de desenvolverme en el ámbito social y académico, además de formarme en la profesión que anhelo.

Al Ing. Miguel Ortega, por su amistad y apoyo como tutor académico a lo largo de mi periodo como estudiante.

Al Ing. Álvaro Aguinaga, por brindarme la oportunidad de redactar el presente proyecto y por su apoyo en los momentos más difíciles a lo largo de mi vida estudiantil.

Juan D. Unda T.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....	II
DEDICATORIA .....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	VIII
ÍNDICE DE ECUACIONES .....	IX
RESUMEN.....	X
ABSTRACT.....	XI
1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	1
1.1 Objetivo general.....	2
1.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 Alcance .....	2
1.4 Marco teórico .....	3
1.4.1. Tipos de procesos de refrigeración asistido por energía solar .....	3
1.4.1.1. Sistemas de Refrigeración por Adsorción y Absorción .....	3
1.4.1.2. Refrigeración asistido por un sistema fotovoltaico.....	5
1.4.2. Formas de transferencia de calor .....	6
1.4.3. Definiciones básicas de termodinámica .....	7
1.4.4. Ciclos de refrigeración .....	9
1.4.5. Propiedades de la leche cruda .....	10
1.4.5.1. Tratamientos térmicos a la leche cruda.....	11
1.4.6. Métodos y equipos para la refrigeración de leche .....	11
1.4.6.1. Procedimientos de refrigeración de leche cruda.....	11
1.4.7. Contexto general de la parroquia de Lloa .....	12
1.4.7.1. Ubicación.....	12
1.4.7.2. Clima .....	12
1.4.7.3. Principales actividades económicas (Ganadería).....	13
1.4.7.4. Radiación solar .....	13
1.4.9.1. Selección de equipo de refrigeración por inmersión.....	14
2 METODOLOGIA.....	17
2.1 Enfoque metodológico (mecatrónico o sistémico global) .....	17
2.2 Descripción del proceso de un sistema de refrigeración con energía solar.....	17
2.3 Modelación matemática.....	18
3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	25

3.1 Datos para el desarrollo de la simulación.....	25
3.2 Análisis de sensibilidad de parámetros para optimización.....	28
3.3 Sistema de refrigeración optimizado.....	31
3.4 Conclusiones .....	34
3.5 Recomendaciones.....	35
4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS. ....	36
6. ANEXOS.....	38
ANEXO I .....	38
ANEXO II .....	39
ANEXO III .....	40
ANEXO IV.....	42
ANEXO V.....	43

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de Clayperon del ciclo de refrigeración por adsorción .....	4
Figura 2. Esquema del sistema de refrigeración solar por absorción utilizando Amoniac y agua.....	4
Figura 3. Sistema fotovoltaico interconectado a la red y asilado. ....	5
Figura 4. Ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor.....	10
Figura 5. Métodos de refrigeración de leche cruda .....	12
Figura 6. Mapa de la irradiación solar global horizontal anual (GHI).....	13
Figura 7. Tanque contenedor y sistema de remolque para automóvil.....	15
Figura 8. Refrigerador de inmersión HM. ....	15
Figura 9. Esquema del sistema fotovoltaico conectado a un sistema de refrigeración y diagrama del ciclo de refrigeración por compresión.....	18
Figura 10. Esquema de resistencias térmicas y diagrama de recipiente.....	20
Figura 11. Respuesta temporal del sistema de refrigeración en lazo abierto.....	27
Figura 12. Respuesta temporal del sistema de refrigeración en lazo cerrado. ....	27



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cantidad y costo de los equipos del sistema solar. ....	16
Tabla 2. Valores referenciales de los parámetros del sistema de refrigeración. ....	26
Tabla 3. Parámetros convenientes para la optimización de un sistema de refrigeración. ....	28
Tabla 4. Porcentaje de variación de parámetros del sistema en función a la temperatura de refrigeración mínima y máxima. ....	29
Tabla 5. Porcentaje de variación de parámetros del <i>sistema</i> en función del tiempo de refrigeración inicial mínimo y máximo. ....	29
Tabla 6. Porcentaje de variación de parámetros del sistema de refrigeración en función del volumen de leche mínimo y máximo. ....	30
Tabla 7. Porcentaje de variación de parámetros del sistema de refrigeración en función del coeficiente de conductividad térmica mínimo y máximo. ....	30
Tabla 8. Valores de los parámetros optimizados del sistema de refrigeración. ....	32

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Masa de leche .....	18
Ecuación 2. Calor necesario de refrigeración.....	18
Ecuación 3. Potencia calórica de refrigeración.....	18
Ecuación 4. Coeficiente global de transferencia de calor .....	19
Ecuación 5. Área superficial.....	19
Ecuación 6. Resistencia térmica total .....	19
Ecuación 7. Resistencias térmicas .....	20
Ecuación 8. Número adimensional de Nusselt.....	21
Ecuación 9. Número adimensional de Reynolds.....	21
Ecuación 10. Número adimensional de Prandtl.....	21
Ecuación 11. Temperatura de película .....	21
Ecuación 12. Número de Nusselt para convección libre flujo laminar .....	22
Ecuación 13. Número de Rayleigh .....	22
Ecuación 14. Coeficiente de desempeño del sistema.....	22
Ecuación 15. variación de energía de un sistema .....	23
Ecuación 16. Balance de energía de entra y salida. ....	23
Ecuación 17. Flujo de energía al sistema.....	23
Ecuación 18. Razón de variación de temperatura en el tiempo.....	23
Ecuación 19. Pérdidas del sistema .....	23
Ecuación 20. Potencia de refrigeración necesaria .....	24
Ecuación 21. Modelo matemático en espacio de estado del sistema .....	24

## RESUMEN

El presente trabajo de integración curricular se enfoca en optimizar un sistema de refrigeración solar de leche cruda, para los productores de lácteos de la parroquia rural de Lloa. En esta localidad varios sectores no cuentan con energía eléctrica lo que dificulta el uso de equipos de refrigeración por lo cual los productores requieren de fuentes alternativas que cubran esta necesidad.

Primeramente, se realizó una estimación de la cantidad de leche que los productores requieren refrigerar, en función a esto se realizó el cálculo para estimar la potencia de refrigeración necesaria, con este valor se procede a seleccionar un método y un equipo de refrigeración adecuados, de acuerdo con el consumo energético del equipo se elige un sistema fotovoltaico de alimentación eléctrica que brinde la capacidad necesaria al menor costo disponible en el mercado.

Con los parámetros establecidos se procede a simular en MATLAB y analizar el sistema en su estado inicial, a continuación, se realiza un análisis de sensibilidad, determinando los parámetros más críticos del sistema y definir los valores más adecuados para reducir las pérdidas, mejorando la eficiencia energética del sistema de refrigeración solar.

Del proyecto realizado se obtiene un sistema optimizado con un control analógico PID, lo que permite una mayor sensibilidad al regular la temperatura de mantenimiento de la leche, también se reducen las pérdidas y aumenta el coeficiente de rendimiento del sistema de refrigeración. Por lo tanto, el sistema obtenido puede ser empleado por los productores de lácteos en el proceso de refrigeración y recolección de leche cruda.

**PALABRAS CLAVE:** Optimización, refrigeración solar, leche cruda, eficiencia, rendimiento, simulación en MATLAB.

## ABSTRACT

This project focuses on optimizing a raw milk solar cooling system for dairy farmers in the rural parish of Lloa. In this locality several sectors do not have electrical energy this hinders the use of refrigeration equipment, so producers require alternative sources of energy.

First, an estimate was made of the amount of milk that producers need to refrigerate, based on this the calculation was made to estimate the necessary cooling power, with this value we proceed to select the equipment, for this project an immersion cooling equipment has been selected, of the Plevnik brand model HM 302K, with a cooling power of 3.75 [kW], the container tank has a maximum capacity of 300 liters, to supply the necessary electrical energy the components of the photovoltaic system are dimensioned, the selected system of the company PROViento S.A. has 9 solar panels, 2 batteries and an inverter of 1.5 [kW].

With the established parameters, we proceed to simulate in MATLAB and analyze the system in its initial state, then a sensitivity analysis is carried out, determining the most critical parameters of the system, and defining the most appropriate values to reduce losses, improving the energy efficiency of the solar cooling system.

From the project carried out, an optimized system with an analog PID control is obtained, which allows greater sensitivity when regulating the maintenance temperature of the milk, reducing losses, and increasing the coefficient of performance of the system. Therefore, the system obtained can be employed by dairy producers in the process of refrigeration and collection of milk.

**KEYWORDS:** Optimization, solar cooling, raw milk, efficiency, performance, simulation in MATLAB.

# 1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

En el presente trabajo de integración curricular se desarrolló un análisis y optimización de un sistema de refrigeración asistido por energía solar, primeramente, se procedió a realizar una recopilación bibliográfica de las condiciones de almacenamiento de leche cruda y sistemas de refrigeración solar y sus condiciones de funcionamiento, para garantizar que sea adecuado para este propósito. En el país la producción de leche y sus derivados es un pilar fundamental para la economía de las parroquias rurales de la provincia de Pichincha, como lo es Lloa, en esta comunidad se recolectan alrededor de 1000 litros semanales en los procesos de ordeño del ganado, la dificultad en el transporte y almacenamiento de la leche cruda genera pérdidas para el sector ganadero.

Para seleccionar adecuadamente el equipo de refrigeración y de alimentación de energía, es necesario conocer la capacidad de enfriamiento requerida por el sistema, de acuerdo con la recopilación bibliográfica, se selecciona un recipiente y su respectivo equipo de refrigeración de inmersión directa con evaporación directa, y para el sistema fotovoltaico de alimentación eléctrica se escoge uno de acuerdo con la potencia del equipo de refrigeración, por lo tanto se establece un presupuesto de \$2 500 para cubrir el costo del sistema de alimentación de energía eléctrica.

Al observar los valores calculados se puede determinar la incidencia en los parámetros de funcionamiento, por lo tanto, se procede a variar las condiciones de trabajo iniciales, para así identificar los parámetros con mayor influencia en el resultado,

Para optimiza la respuesta temporal del sistema se debe emplear el control automático adecuadamente, identificando los valores críticos mediante un análisis de sensibilidad, donde se definen los valores apropiados para el adecuado funcionamiento del sistema de refrigeración, mediante el uso de funciones transferencia y una entrada tipo escalón (Step) se procede a graficar las respuestas temporales en lazo abierto o lazo retroalimentado, en estas graficas se puede observar la estabilización del sistema después de un enfriamiento inicial, en un tiempo establecido, además se utiliza un control PID para modular y controlar la temperatura de mantenimiento de la leche, lo que permite una mejor precisión al regular el gradiente de temperatura de  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ , establecido por la norma INEN9:2015, de esta manera se logra mantener la temperatura casi constante, evitando afectar las propiedades de la leche cruda.

## 1.1 Objetivo general

Optimizar un sistema de refrigeración solar empleando un enfoque sistémico y mecatrónico, mejorando el rendimiento del proceso termodinámico y térmico del sistema de refrigeración solar, para la parroquia de Lloa, en busca de mejorar las condiciones de los productores de lácteos de la zona

## 1.2 Objetivos específicos

1. Recopilar los conceptos fundamentales de un proceso termodinámico mediante una revisión bibliográfica.
2. Establecer el método adecuado para la optimización de un sistema de refrigeración solar.
3. Sintetizar un modelo matemático con representación de espacio de estado del proceso termodinámico de un sistema de refrigeración solar.
4. Simular el modelo obtenido, mediante la aplicación del software pertinente.
5. Determinar las condiciones y parámetros adecuados para la optimización del sistema de refrigeración solar

## 1.3 Alcance

Objetivo específico 1 (OE1): Recopilar los conceptos fundamentales de un proceso termodinámico mediante una revisión bibliográfica.

- Actividad (A1.1): Levantamiento de la información pertinente acerca de un proceso termodinámico para un sistema de refrigeración solar.
- Actividad (A1.2): Análisis y sistematización de la información obtenida.
- Actividad (A1.3): Elaboración de un resumen de todos conceptos necesarios en el proceso termodinámico.

Objetivo específico 2 (OE2): Establecer el método adecuado para la optimización de un sistema de refrigeración solar.

- Actividad (A2.1): Levantamiento a nivel nacional e internacional de información referente a tecnologías de un refrigerador asistido por energía solar.
- Actividad (A2.2): Evaluación de los modelos más adecuados para la refrigeración de lácteos.
- Actividad (A2.3): Selección del modelo más eficiente para el sistema de refrigeración solar.

Objetivo específico 3 (OE3): Sintetizar un modelo matemático con representación de espacio de estado del proceso termodinámico de un sistema de refrigeración solar.

- Actividad (A3.1): Desarrollo del modelo matemático pertinente para el proceso termodinámico.
- Actividad (A3.2): Representación en espacio de estado del proceso termodinámico.
- Actividad (A3.3): Elaboración de la memoria del modelo matemático y su representación en espacio de estado de proceso térmico y termodinámico de un sistema de refrigeración solar.

Objetivo específico 4 (OE4): Simular el modelo obtenido, mediante la aplicación del software pertinente.

- Actividad (A4.1): Simulación del modelo de espacio de estado del proceso térmico y termodinámico.
- Actividad (A4.2): Análisis de la información obtenida de la simulación.
- Actividad (A4.3): Elaboración de la memoria de los resultados obtenidos de simulación.

Objetivo específico 5 (OE5): Determinar las condiciones y parámetros adecuados para la optimización del sistema de refrigeración solar.

- Actividad (A5.1): Evaluación de los parámetros y condiciones del sistema de refrigeración solar.
- Actividad (A5.2): Determinación de los parámetros para la optimización del proceso térmico y termodinámico de un sistema de refrigeración solar.

## **1.4 Marco teórico**

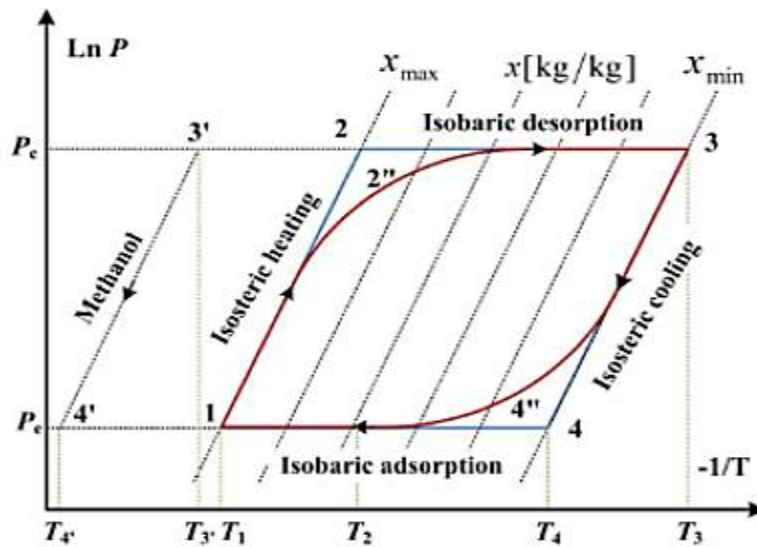
### **1.4.1. Tipos de procesos de refrigeración asistido por energía solar**

#### **1.4.1.1. Sistemas de Refrigeración por Adsorción y Absorción**

En un sistema de refrigeración térmico se emplea el calor de una sustancia diferente al producto, por lo tanto, para la generación de frío por absorción se requiere de una mezcla entre un absorbente y adsorbato, esta mezcla requiere de gran energía para su regeneración. Por otro lado, la adsorción se fundamenta en la producción de frío a partir del calor provisto por un fluido a una temperatura establecida. (Moreno, Bandarra, & Guevara, 2017).

De acuerdo con Bohórquez, Guillén, Imbert, & Hernández, (2020), en la Figura 1, se puede observar el principio de funcionamiento de un ciclo de adsorción asistido por energía solar, la energía aplicada del punto 1-2 es necesario para que el refrigerante sea absorbido por el adsorbente, la energía en los puntos de 2-3 es la necesaria para que se produzca el proceso de desorción, calentando el adsorbente, del punto 4-1 se

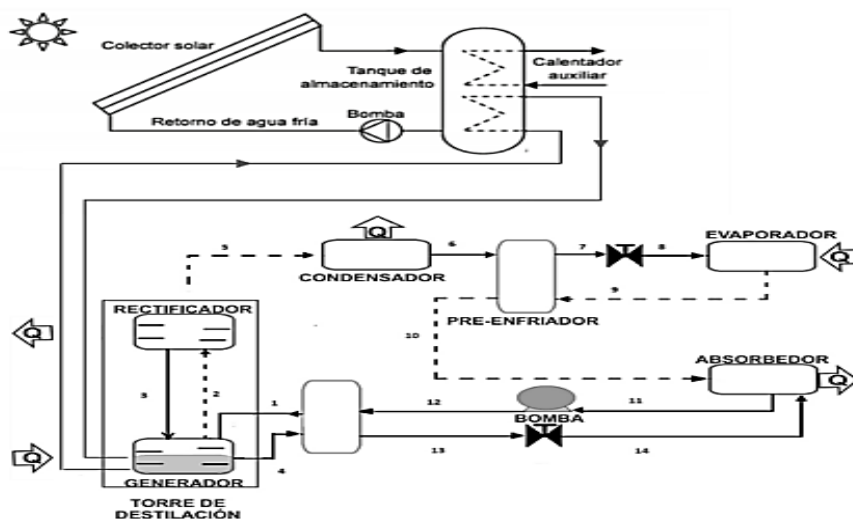
produce la adsorción y se repite el ciclo.



**Figura 1.** Diagrama de Clapeyron del ciclo de refrigeración por adsorción

**Fuente:** (Ambarita & Kawai, 2016)

En la Figura 2 se puede observar las partes del esquema de un sistema de refrigeración solar por absorción que utiliza amoníaco y agua como fluidos. En el sistema la energía solar es recolectada por el colector y almacenada en el tanque, para de sorber el amoníaco se filtra agua caliente al generador, obteniendo vapor de la solución, en el proceso el agua se condensa y es reenviada al generador, en el condensador se enfría el amoníaco, que se evapora a una presión reducida en el evaporador, esto proporciona la refrigeración del producto o espacio requerido. Para obtener una mejor eficiencia en este proceso la temperatura del agua o absorbente es fundamental. (Valle, Nieto, Morales, & Enrique, 2017)



**Figura 2.** Esquema del sistema de refrigeración solar por absorción utilizando Amoníaco y agua.

**Fuente:** (Valle, Nieto, Morales, & Enrique, 2017)



### 1.4.1.2. Refrigeración asistido por un sistema fotovoltaico.

Para un sistema de refrigeración alimentado por energía solar solamente es necesario implementar un procedimiento de recolección y almacenamiento de la energía eléctrica producida por las células fotovoltaicas, ya que no se utilizará toda la energía producida es necesario una unidad de almacenamiento o banco de baterías, además de un inversor para convertir la corriente continua a corriente alterna con una eficiencia del 90%. Para no generar una descarga de la energía almacenada se puede optimizar los tiempos de funcionamiento del equipo de refrigeración, controlando la carga y el inversor con un sistema de monitoreo y control automático, logrando una mayor eficiencia en el ciclo de refrigeración y el consumo de energía.

En la Figura 3, se puede observar que un sistema de alimentación eléctrica con energía solar puede funcionar con un banco de baterías o estar conectado a la red nacional de suministro eléctrico, ya que los sistemas de refrigeración por compresión emplean este tipo de energía para su funcionamiento es fundamental mantener el suministro, por lo tanto, se puede emplear un sistema que trabaje de las dos formas posibles.



**Figura 3.** Sistema fotovoltaico interconectado a la red y asilado.

**Fuente:** (INCSolar, 2021)

Para este proyecto se empleará un sistema fotovoltaico para la dotación de energía eléctrica al equipo refrigerador, el cual se utilizará para disminuir la temperatura de la leche, el equipo emplea una sistema de refrigeración por compresión.

### 1.4.2. Formas de transferencia de calor

En la naturaleza podemos encontrar diferentes tipos de interacción entre los sistemas que poseen energía, la cual puede ser energía calórica, para transferir esta energía se pueden tener los siguientes mecanismos de transferencia de calor los cuales son: conducción, radiación y convección, para que estos mecanismos se desarrollen debe existir una diferencia de temperatura. De estos se puede resaltar que la convección requiere de un flujo de masa además de una diferencia de temperatura. (Kreith, 2012)

#### **Conducción.**

Cuando dos partes de un material se mantienen a diferentes temperaturas, la energía se transfiere mediante colisiones moleculares de las temperaturas más altas a las más bajas. En este proceso de conducción también participa el movimiento de los electrones libres dentro de la sustancia. (Incropera, DeWitt, Bergman, & Lavine, 2017).

#### **Convección.**

El modo de transferencia de calor por convección se compone de dos mecanismos. Además de la transferencia de energía debido al movimiento molecular aleatorio (difusión), la energía también se transfiere por el movimiento del fluido, el cual se asocia con el hecho de que, en cualquier instante, un gran número de moléculas se mueven colectivamente, y este movimiento se produce en presencia de un gradiente de temperatura, contribuye a la transferencia de calor. (Incropera, DeWitt, Bergman, & Lavine, 2017)

La transferencia de calor por convección se puede clasificar según la naturaleza del flujo. Hablamos de convección forzada cuando el flujo es causado por medios externos, como un ventilador, una bomba o vientos atmosféricos. La tasa de transferencia de calor por convección entre una superficie y un fluido se puede cuantificar conociendo el coeficiente de transferencia de calor, la diferencia de temperaturas y el área de transferencia. (Kreith, 2012)

#### **Radiación:**

La radiación térmica es la energía emitida por la materia que está a una temperatura distinta de cero, la emisión también puede ocurrir a partir de líquidos y gases. Independientemente de la forma de la materia, La energía del campo de radiación es transportada por ondas electromagnéticas, la radiación no necesita un medio para emitirse, De hecho, la transferencia de radiación ocurre de manera más eficiente en el vacío. La tasa de radiación se puede cuantificar conociendo la emisividad y temperatura de la superficie, además de la temperatura de los alrededores. (Incropera, DeWitt, Bergman, & Lavine, 2017)

### 1.4.3. Definiciones básicas de termodinámica

La **termodinámica** se enfoca en el cambio de las energías que pueden ser térmica, mecánica, cinética, potencias, eléctrica, magnética, química, cuya suma conforman la energía total de un sistema. La suma de todas las formas microscópicas de energía se suele denominar **energía interna** del sistema, esta se relaciona con el estado de presión y temperatura del sistema. (Çengel, 2015)

Mecanismos de transferencia de energía pueden ser transferencia de calor, trabajo y flujo masico. **La transferencia de calor** ( $Q$ ) es el incremento de energía de las moléculas de un sistema generando un aumento de temperatura en el sistema, siempre se transfiere de un cuerpo con mayor temperatura hacia uno de menor temperatura. Una interacción de energía que no es causada por una diferencia de temperatura, esto se considera como **trabajo** ( $W$ ), la transferencia de trabajo desde un sistema disminuye la energía del sistema. El **flujo masico** que entra y sale de un sistema funciona como un mecanismo de transferencia de energía. (Çengel, 2015)

**Un sistema** se define como una cantidad de materia determinada. La frontera de un sistema es una línea imaginaria o real que define un sistema y lo separa de los alrededores. Los alrededores son todo lo que se encuentre fuera de las fronteras del sistema, y “los alrededores inmediatos son el espacio que es afectado por el proceso, y el ambiente es la región que se encuentra lejos de los alrededores inmediatos cuyas propiedades en cualquier punto no son afectadas por el proceso”. (Borgnakke, 2013)

“**Un proceso es reversible** cuando el sistema y los alrededores pueden volver a su condición inicial, por lo tanto, cualquier proceso que no cumple con esta condición se dice que es irreversible” (Çengel, 2015)

“Una sustancia que posea una composición química fija en cualquier estado se denomina **sustancia pura**”. (Çengel, 2015)

“**Presión** es la fuerza normal que ejerce un fluido en un área determinada, se trata como presión cuando se trata con fluido como gases o líquidos”. (Çengel, 2015)

“El **volumen específico**, que se define como el volumen por unidad de masa.” (Çengel, 2015)

“Las **propiedades intensivas** son aquellas independientes de la masa de un sistema, como temperatura, presión y densidad. Las **propiedades extensivas** son aquellas cuyos valores dependen del tamaño o extensión del sistema” (Çengel, 2015)

El **trabajo de flujo** es la energía de un fluido compresible, solo puede lograr esta energía con el paso de un fluido por las secciones de control, esto incrementa su energía almacenada. Las secciones de control pueden ser cualquier sección transversal por la que cruza el flujo de fluido. La fórmula a continuación define matemáticamente el trabajo del flujo. (Aguera, 2014)

**Energía calórica** es energía térmica que se cuantifica como la cantidad de calor que contiene un sistema. Las energías que interaccionan con un medio o sistema se pueden reconocer ya que cruzan las fronteras del sistema y se considera como energía que se pierde o se gana, estas las principales interacciones de energía con un sistema cerrado son el trabajo y la transferencia de calor. (Çengel, 2015)

De acuerdo con, Çengel (2015), el **calor** se puede definir como “la energía que se transmite entre un sistema y otro, o con el medio externo, esto se puede dar gracias una diferencia de temperatura, por lo que no se puede dar entre dos sistemas que tiene la misma temperatura”. (Çengel, 2015)

### **1era Ley de la termodinámica.**

Es una expresión que considera la conservación de la energía, además considera que la energía es una propiedad térmica. Al emplear un balance de masa y energía general para cualquier sistema que experimenta un proceso se obtiene la igualdad, donde se determina que el cambio de la energía contenida en un sistema es igual a la diferencia entre la energía de entrada y de salida, que puede expresarse como un flujo de energía en función del tiempo. (Çengel, 2015).

### **2da Ley de la termodinámica.**

Esta ley menciona que una determinada cantidad de energía posee calidad, la cual se reduce en los procesos de transferencia. Esta ley también “ayuda a determinar los límites teóricos de desempeño de un sistema. Se usa para lograr cuantificar el nivel de perfección de un proceso, lo que ayuda a eliminar imperfecciones”. (Çengel, 2015); También a través de este principio se puede identificar y fijar los criterios para la estabilidad y el equilibrio de un sistema. (Nieto Carlier, 2014)

La entropía es una propiedad termodinámica directamente relacionada con el flujo de calor en un sistema con una temperatura definida, además de ser una propiedad que no se conserva, por lo tanto, se incrementa durante todos los procesos, donde la temperatura del sistema se acerca al equilibrio térmico. (Çengel, 2015)

La **exergía** es una propiedad que permite determinar la máxima capacidad de generación de trabajo útil de una cantidad de energía en un estado específico, también se puede definir como la disponibilidad de energía en un sistema. (Çengel, 2015); Este principio también nos permite determinar la cantidad de calor en función del trabajo útil (exergía) y de la energía que no se ha transformado en trabajo (**anergia**). (Nieto Carlier, 2014)

La **anergia** es la parte de la energía de un sistema que no se transforma en trabajo, también se le denomina exergía destruida. El flujo de la anergia se puede cuantificar

empleando la entropía de cada proceso. (Aguera, 2014)

El **ciclo de Carnot** es un ciclo eficiente que se compone de cuatro procesos reversibles los cuales son la expansión y compresión de forma isotérmica y adiabática. La **máquina térmica de Carnot** puede transformar el trabajo en otra forma de energía en este caso calor, por lo general estas máquinas reciben calor y convierten una parte del calor en trabajo, hay que tener en cuenta que existen pérdidas de calor. Estas máquinas requieren de un fluido que transfiera esta energía a lo largo del ciclo. (Çengel, 2015)

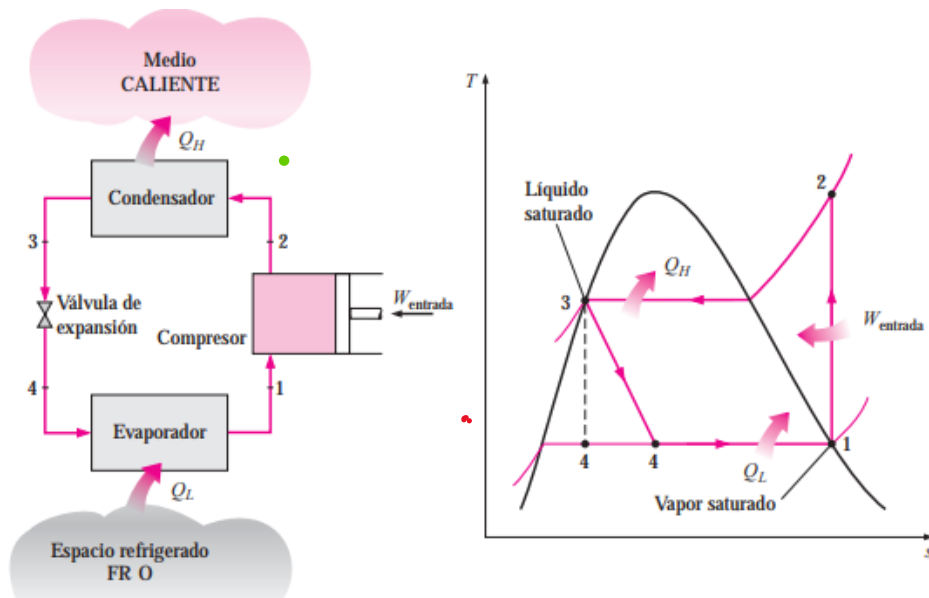
Para absorber calor de un sistema se requiere aplicar energía en forma de trabajo, considerando también las pérdidas y rechazo de calor, lo que esto se puede definir como el **ciclo de Carnot Inverso**, este ciclo es empleado para el funcionamiento de las bombas de calor y refrigeradores. (Çengel, 2015)

#### **1.4.4. Ciclos de refrigeración**

La refrigeración es una de las aplicaciones de la termodinámica, ya que implica una transferencia de energía, en este caso en forma de calor, para lograr disminuir la temperatura de un sistema se requieren de máquinas llamados refrigeradores los cuales emplean ciclos de refrigeración, el más común es por compresión de vapor, otro como el ciclo de refrigeración en cascada, por absorción o termo eléctrica son empleado en situaciones especiales ya que pueden representar costos elevados.

##### **1.4.4.1. Ciclo de refrigeración por compresión**

Para un ciclo de refrigeración es necesario un medio de transporte la energía en forma de calor ya sea sensible o latente, para esto se utiliza un fluido llamado refrigerante. En un ciclo que involucra compresión tendremos presiones y temperatura elevadas. Para este ciclo es necesario evaporar completamente el refrigerante, este proceso se desarrolla en el evaporador y posteriormente comprimiendo hasta lograr una fase de vapor sobrecalentado y para cumplir con el ciclo el refrigerante debe volverse un fluido completamente en el condensador. El ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor se obtiene al implementar un dispositivo de estrangulamiento y una válvula de expansión. Una representación esquemática y el diagrama T-S se puede observar en la Figura 4. (Çengel, 2015)



**Figura 4.** Ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor.

**Fuente:** (Çengel, 2015)

De acuerdo con Çengel (2015), en el diagrama T-S podemos observar que el proceso de 1-2 aplicando un trabajo del compresor se logra una compresión isentrópica, de 2-3 existe un rechazo de calor al ambiente desde el condensador, de 3-4 una variación de temperatura y entropía en la válvula de expansión, 4-1 el evaporador absorbe el calor del espacio que se necesita refrigerar.

#### 1.4.5. Propiedades de la leche cruda

De acuerdo con la norma (NTE INEN 9 , 2015), los requisitos fundamentales para la leche cruda de vaca que será adecuada para el procesamiento, esta norma especifica las condiciones previas a cualquier modificación en su composición o tratamiento térmico, excepto el enfriamiento para la conservación. La leche cruda se define como la leche que no ha superado una temperatura mayor a 40 °C, después de haber sido extraída del animal, esta leche debe ser enfriada y almacenada a una temperatura menor a los 10°C, hasta su recepción en las plantas de pasteurizado, también debe ser filtrada y agitada constantemente.

La norma establece que “la densidad relativa es de 1,033 y 1,032 a los 15 °C y 20°C respectivamente”. (NTE INEN 9 , 2015)

Otras propiedades como el punto de congelación es un valor que varía entre -0.536 y -0,512°C y el punto de ebullición es de 100,17°C, además la viscosidad es una propiedad fundamental de los fluidos para la leche cruda se encuentra entre 1.85 y 2.15 cp. Otra propiedad fundamental es el calor específico 0.93 J/kg °C. (Cacuango & Santafé, 2011)

#### **1.4.5.1. Tratamientos térmicos a la leche cruda.**

Los tratamientos térmicos que se emplean para conservar la leche permiten aumentar la vida útil y obtener un producto más salubre y apto para el consumo, ya que los gérmenes y bacterias que se encuentran en la leche recién ordeñada es necesario emplear cualquier tratamiento térmico que eleve o reduzca la temperatura para así limitar el crecimiento de estos microorganismos.

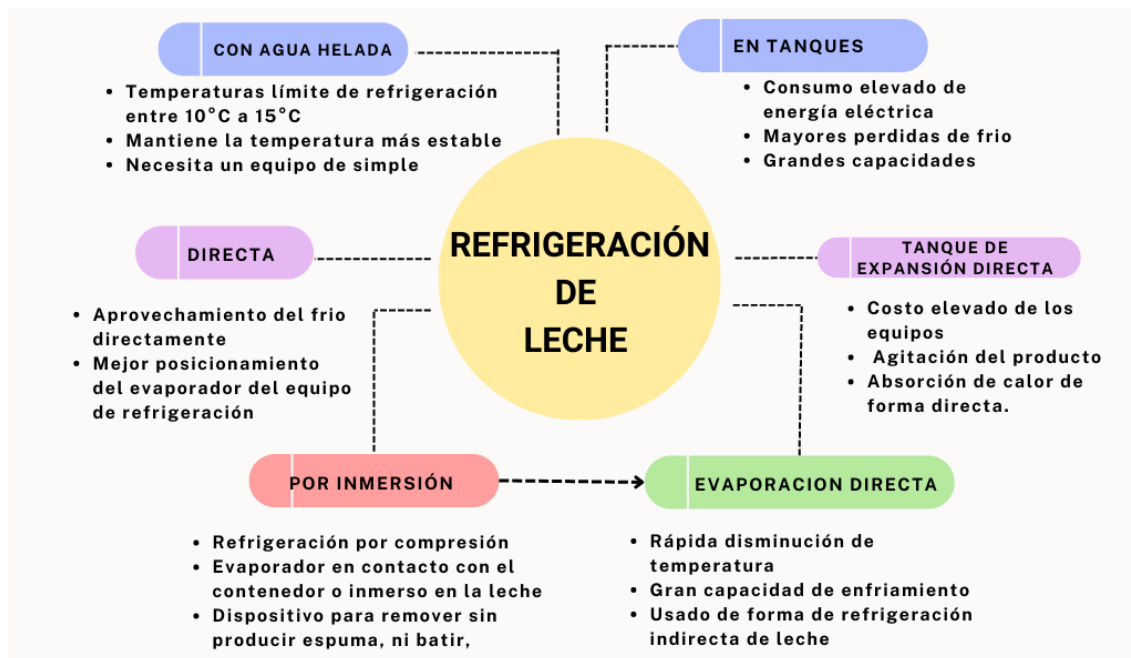
Independientemente de la cantidad de leche en cada ordeño y la temperatura de ingreso al envase de refrigeración, se establece un plazo de 2 horas para que la cantidad de los microorganismos permanezca aproximadamente constante por lo cual es necesario reducir la temperatura de la leche lo más pronto posible, la temperatura debe ser menor o igual a 10 °C para ralentizar el crecimiento de bacterias, pero para conservar la leche entre 48 y 72 horas es necesario mantenerla entre 4 °C  $\pm$ 2°C, esto cumple con la norma NTE INEN 09;2015, que especifica las condiciones permitidas para la conservación de leche cruda apta para su recolección y su posterior pasteurización.

#### **1.4.6. Métodos y equipos para la refrigeración de leche**

##### **1.4.6.1. Procedimientos de refrigeración de leche cruda.**

Se necesita mantener una temperatura estable de 2°C a 4°C para evitar la proliferación de bacterias en la leche cruda, esto se puede lograr con una refrigeración adecuada. En la Figura 5, se observan varios métodos para refrigerar leche, los cuales se pueden emplear en este proyecto, el uso de agua helada con la ayuda de bidones, la refrigeración por inmersión por evaporación directa, o también tanque de expansión directa.

De acuerdo con la cantidad y las condiciones de la leche cruda se ha determinado que el método que tiene la capacidad de refrigeración necesaria y genera el menor consumo de energía posible, es la refrigeración por inmersión con evaporación directa.



**Figura 5.** Métodos de refrigeración de leche cruda

Fuente: (Hernandez)

#### 1.4.7. Contexto general de la parroquia de Lloa

En este segmento del proyecto se establecen las características y aspectos fundamentales que influyen en la refrigeración de leche en la parroquia de Lloa.

##### 1.4.7.1. Ubicación

La parroquia de Lloa se ubica entre los 1800-3400 msnm en el valle de las faldas del volcán Guagua Pichincha, esta parroquia se ubica a 9 km al suroeste del Distrito Metropolitano de Quito, pertenece a la administración municipal zona sur "Eloy Alfaro". (Consultora Morales, 2019)

##### 1.4.7.2. Clima

Al ser una parroquia ubicada en la Cordillera de los Andes se presentan temperaturas mínimas de 0-4 °C y máximas de 24-26 °C, esto nos da una temperatura media de 14 °C hasta 9.5°C en las regiones más elevadas sobre el nivel del mar (3400 msnm). Se puede considerar que la intensidad de los vientos es moderada ya que se presenta una velocidad media de entre 3 a 4 m/s, con una dirección predominante norte. (Consultora Morales, 2019)

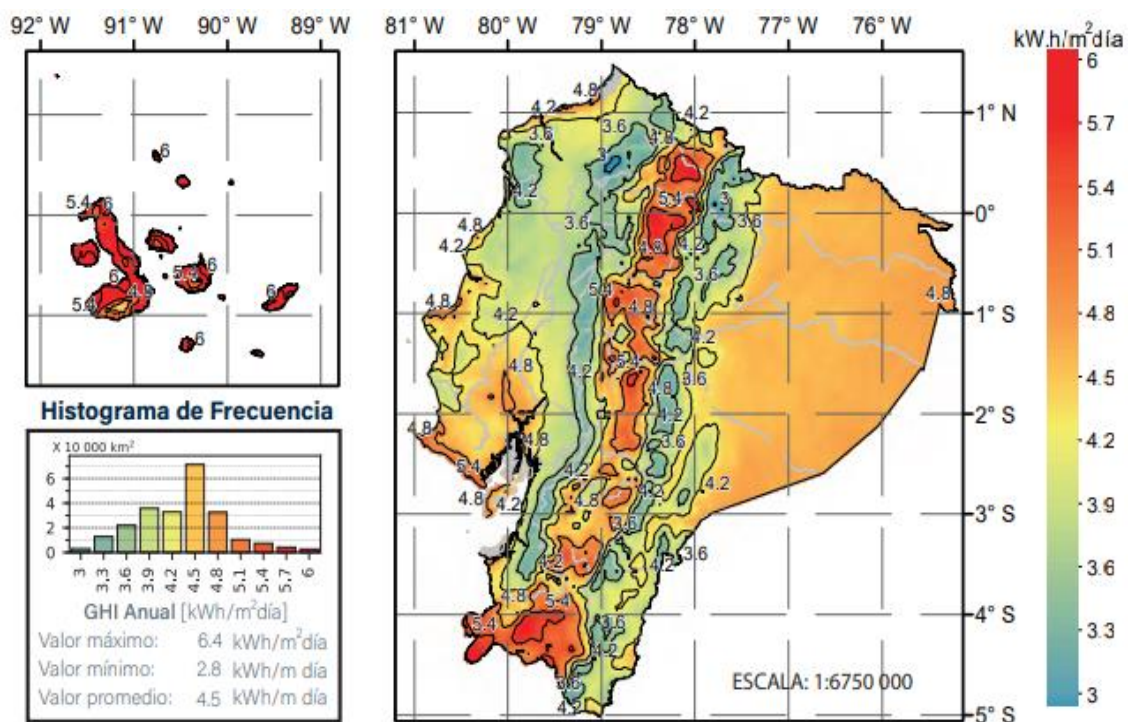


### 1.4.7.3. Principales actividades económicas (Ganadería)

La producción ganadera genera recursos como la leche y sus derivados para su comercialización, pero en mayor parte estos productos se emplean en el consumo interno, también parte de estos productos son receptados por los acopiadores que entregan el producto a las empresas pasteurizadoras. La red de energía eléctrica ha permitido la implementación de equipos de almacenamiento y procesamiento de leche. (Consultora Morales, 2019)

### 1.4.7.4. Radiación solar

La radiación solar es una fuente de energía no contaminante, lo que impulsa su uso para la generación de energía eléctrica, ya que la mayoría de los equipos utilizados en las industrias y los hogares requieren de electricidad para su funcionamiento, por lo cual es de vital importancia encontrar una fuente de energía renovable para abastecer las necesidades de la comunidad. El Ecuador al ser un país que se encuentra sobre la línea ecuatorial posee niveles de radiación elevados, como se puede observar en la Figura 6. La irradiación solar global horizontal (GHI) en parroquia de Lloa varía entre el valor promedio (4.5 kWh/m<sup>2</sup>/día) y máximo anual (6.4 kWh/m<sup>2</sup>/día) ya que se ubica en la región interandina. (Ordoñez & Vaca, 2019).



**Figura 6.** Mapa de la irradiación solar global horizontal anual (GHI).

**Fuente:** (Ordoñez & Vaca, 2019)

#### **1.4.8. Condiciones ambientales de diseño según ASHRAE 2017**

En el Anexo I se presentan las condiciones anuales que registra la ASHRAE en el año 2017 se refieren al Parque Bicentenario de Quito que se ubica a 2813 m.s.n.m., por lo tanto, esta información puede ser tomada como referencia para los posteriores cálculos. Las temperaturas exteriores son 21,9 [°C], de bulbo seco, 14,5 [°C] de bulbo húmedo, en verano (0,4%), con una velocidad media coincidente del viento de 3,8 [m/s] y una máxima anual de 7,7 m/s. (ASHRAE, 2017)

#### **1.4.9. Selecciones de equipos para el sistema de refrigeración de leche asistido por energía eléctrica**

Para desarrollar una adecuada selección se deben establecer las condiciones de trabajo, primeramente, la cantidad del producto que se desea refrigerar, en este caso 100 litro de leche recién ordeñada, posteriormente se establece un tiempo de 1 hora para reducir la temperatura. Con esas condiciones se puede determinar un equipo adecuado, de acuerdo con la bibliografía investigada el sistema de refrigeración por inmersión es el más eficiente para un fluido como la leche. La cantidad de energía necesaria consumida por el equipo para refrigerar la leche se emplea para seleccionar un sistema fotovoltaico de alimentación de energía eléctrica para el funcionamiento del sistema de refrigeración.

##### **1.4.9.1. Selección de equipo de refrigeración por inmersión.**

Para este proceso de refrigeración se empleará un recipiente con su respectivo sistema de refrigeración, por lo tanto, se procedió a seleccionar los equipos pertinentes en función a las condiciones ambientales y la capacidad de refrigeración requerida. El equipo seleccionado posee un tanque de almacenamiento de producto y su respectivo enfriador por inmersión, estos equipos son de la marca PLEVNIK, en el catálogo adjunto en el Anexo II se tienen las características de varios equipos de los cuales se procede a seleccionar, los más adecuados para las condiciones establecidas previamente.

Recipiente: Se ha seleccionado un contenedor de una capacidad de 300 litros, 810 [mm] diámetro externo y 800 [mm] de profundidad, además cuenta con un remolque para automóvil, como se observa en la Figura 7. El recipiente portátil está compuesto completamente de acero inoxidable 1.4301 y está aislado con una espuma de poliuretano, sin CFC, que es seguro para el medio ambiente.



**Figura 7.** Tanque contenedor y sistema de remolque para automóvil.

**Fuente:** (PLEVNIK, 2019)

Equipo de refrigeración por inmersión: El evaporador seleccionado permite una refrigeración de 90-105 litros en una hora, permite el uso en un medio de enfriamiento ambientalmente seguro, el cuerpo de enfriamiento soldado con un volumen pequeño es más fácil de mantener. El control automático del equipo permite un enfriamiento más eficiente de la leche, el agitador es eficiente incluso con pequeñas cantidades de leche, este sistema con el evaporador inmerso en la leche reduce el tiempo de enfriamiento y disminuye el consumo de energía, el evaporador funciona con una potencia eléctrica de 1.5 kW y provee una capacidad de enfriamiento promedio de 3750 W.

Immersion cooler type	HM 302 K
Diameter of the evaporator (mm)	390
Power supply V-50Hz	230 (400)
Thermal switch of the compressor	-
Pressure protection of the comp.	-
Electrical power (kW)	1.5
Average cool. power (ISO 5708)(W)	3750
Quantity of milk (l) cooled in 1h	90 - 105
Stirrer speed (rpm)	46
Height of the evaporator (mm)	210
Weight of the evaporator (kg)	15
Cooler height (mm)	800
Height of the casing (mm)	480
Width of the casing ( mm)	680
Depth of the casing (mm)	540
Weight - total ( kg )	79
Code	4.002.33



**Figura 8.** Refrigerador de inmersión HM.

**Fuente:** (Plevnik, 2019)

#### 1.4.9.2. Selección de equipo de alimentación eléctrica con panel fotovoltaico

La producción de electricidad a partir de energía solar, como una alternativa, ya que es una fuente renovable, por las necesidades energéticas en parroquias rurales como Lloa y sus alrededores, es de vital importancia implementar un sistema fotovoltaico para proveer de la energía necesaria para el funcionamiento de un equipo de refrigeración de leche, para beneficiar al sector ganadero del sector.

De acuerdo con Aulestia y Celi (2017), mencionan varios costos para un sistema de 1000Wp, los cuales fueron obtenidos de varias empresas dentro del país como PROViento S.A., Renova Energías, Remate Directo, y otras fuera del país como, YUHUAN SINOSOLA SCIENCE & TECHNOLOGY y FOSHAN TANFON ENERGY TECHNOLOGY empresas de China. Los autores han seleccionado equipos de la empresa SINOSOLA, ya que al cumplir con todos los estándares y poseer un menor costo en comparación a las otras empresas consultadas, se utiliza un inversor, un controlador, dos baterías, un soporte de aluminio y 6 paneles de 167 W con un costo de \$ 141 cada uno, obteniendo así una potencia teórica instalada de 1 002 kW, el sistema de alimentación eléctrica con panel fotovoltaico tiene un costo total de \$ 1 865 dólares.

En este proyecto para la selección del panel fotovoltaico es necesario el valor de la energía requerida para el funcionamiento del equipo de refrigeración, en este caso un rango de 1,1-1,5 kW de potencia, de acuerdo con este valor se determina la cantidad de paneles fotovoltaicos necesarios en función de la capacidad y el costo del panel anteriormente mencionados por Aulestia y Celi (2017), si se emplean 9 paneles con un costo de \$ 1 269 obtiene una potencia teórica de 1503 kW y si tomamos de referencia los mismos valores de los equipos restantes, obtenemos un costo total de \$ 2 288.

La empresa nacional PROViento S.A., provee de combos solares en los que se incluye todos los componentes del sistema de alimentación eléctrica para su funcionamiento, por lo cual se procede a estimar la cantidad de paneles necesarios, en este caso son 9 paneles de 170W y con un costo de \$ 120 cada uno, además de dos baterías, un inversor, un controlador y sus terminales, en la Tabla 1 se puede observar todos los componentes y su respectivo valor, además del costo total de \$ 2217.92. (PROViento S.A., s.f.)

**Tabla 1.** Cantidad y costo de los equipos del sistema solar.

<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor</b>
Panel solar 170Wp	9	\$ 1080
Batería 24VDC	2	\$ 604,8
Inversor 1500 W	1	\$ 358,4
Controlador	1	\$ 156,8
Terminales	2	\$ 17,92
<b>TOTAL</b>		<b>\$ 2 217,92</b>

**Nota.** Datos tomados de (PROViento S.A., s.f.)

## **2 METODOLOGIA**

En este capítulo se describe la metodología que se empleara para el desarrollo de este Trabajo de Integración Curricular. Para cumplir con los objetivos, se elaboró una investigación sistemática y cuantitativa de las variables involucradas en el proceso de refrigeración, siendo el objetivo principal la optimización de los parámetros fundamentales presentes. También se debe considerar las necesidades principales de los productores de la parroquia de Lloa.

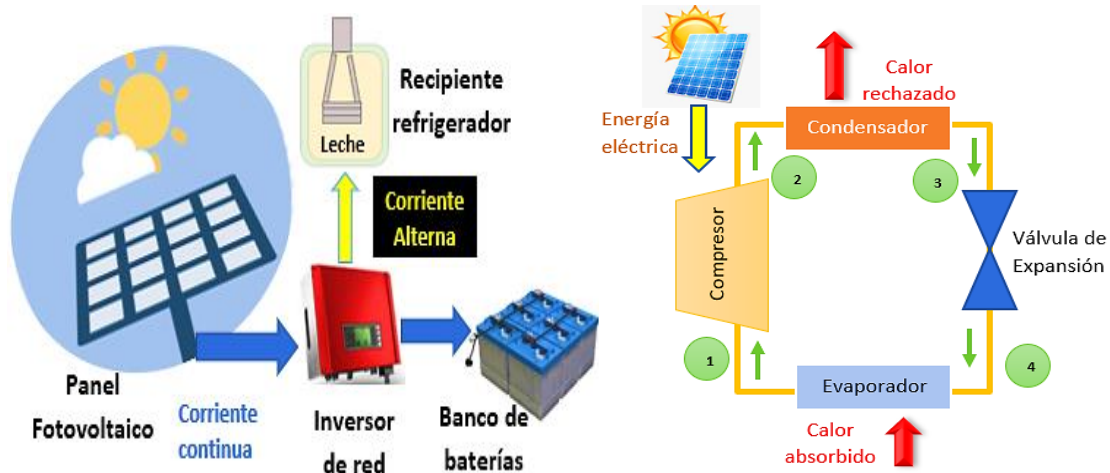
### **2.1 Enfoque metodológico (mecatrónico o sistémico global)**

En la Ingeniería Mecánica se utilizan varias disciplinas como son: la termodinámica, la transferencia de calor y el control automático, las cuales son necesarias y de gran importancia para el desarrollo del presente proyecto, por lo cual se utilizará un enfoque mecatrónico que integra de manera holística y sinérgica las disciplinas anteriormente mencionadas, con el objetivo de satisfacer la necesidad de los productores de leche cruda de la parroquia de Lloa de la manera más adecuada posible. La solución que se establece en este proyecto permite que el proceso de refrigeración se desarrolle de la manera más eficaz y además eficientemente, en función al consumo de energía.

En el presente proyecto se emplearán el enfoque sistémico, para el estudio del sistema de refrigeración y sus partes, así como el enfoque holístico que establece que el sistema se comportara de manera diferente a cada una de sus partes, con lo cual se establece un análisis de diferentes métodos de optimización de la dinámica de los sistemas, además de estos es necesario establece un enfoque ambiental en el cual se seleccionara una de las mejores alternativas establecidas dentro del proyecto.

### **2.2 Descripción del proceso de un sistema de refrigeración con energía solar.**

Dentro del proceso de refrigeración se establecen varios subprocesos los cuales son dependientes uno del otro. De acuerdo con la recopilación bibliográfica se plantearán las ecuaciones necesarias para realizar un procedimiento de refrigeración adecuado. En este proyecto se establece un sistema de refrigeración asistido por energía solar, mediante el uso de un panel fotovoltaico, esta energía lumínica es transformada en la energía necesaria para cumplir con el proceso de refrigeración, como se puede observar en la Figura 9. Para el desarrollo del modelo matemático y su posterior simulación, es necesario establecer las condiciones de funcionamiento adecuadas, mediante la variación de temperatura de refrigeración del sistema, y las condiciones del producto (leche cruda), se puede establecer el control (PID) para lograr la optimización deseada del sistema, ya sea por el consumo de energía o las temperaturas deseadas.



**Figura 9.** Esquema del sistema fotovoltaico conectado a un sistema de refrigeración y diagrama del ciclo de refrigeración por compresión.

**Fuente:** Elaboración propia.

Para una optimización del sistema de refrigeración se deben establecer las variables principales que pueden ser optimizadas, y las que no son dependientes del proceso.

### 2.3 Modelación matemática

Para desarrollar el modelo de un sistema de refrigeración es necesario establecer el calor que ingresa y el calor que se pierde en el ciclo, esto se determina con las condiciones establecidas para el ciclo de refrigeración.

#### Potencia calórica

Para tener una referencia de cuánta energía se requiere para refrigerar los 100 litros de leche, se determina la potencia calórica con la **Ecuación 3**, para obtener este valor es necesario calcular la masa con la Ecuación 1 y el calor necesario con la Ecuación 2,

$$m = V * \rho$$

**Ecuación 1.** Masa de leche

$$q = m C_p \Delta T$$

**Ecuación 2.** Calor necesario de refrigeración

$$Q = \frac{q}{t}$$

**Ecuación 3.** Potencia calórica de refrigeración.

Donde:

$m$ : masa de leche [kg]

$V$ : Volumen [ $m^3$ ]

$\rho$ : Densidad [ $kg/m^3$ ]

$q$ : Calor de refrigeración [J]

$c_p$ : Calor específico de la leche  $[\frac{J}{kg^{\circ}C}]$

$\Delta T$ : Variación de temperatura [ $^{\circ}C$ ]

$t$ : tiempo de refrigeración [s]

$Q$ : Potencia de refrigeración [W]

### **Cargas térmicas.**

Para un adecuado análisis de las condiciones de refrigeración se debe tener en cuenta las pérdidas del sistema de refrigeración, por lo tanto, es necesario determinar este valor. Es primordial calcular del coeficiente global de transferencia de calor, con la Ecuación 4, para las conocer las perdidas por la estructura del tanque de recolección de leche cruda. El área superficial, se obtiene con la Ecuación 5, y la resistencia térmica total con la Ecuación 6.

$$U = \frac{1}{A_s * R_{total}} \quad [\frac{W}{m^2K}]$$

**Ecuación 4.** Coeficiente global de transferencia de calor

$$A_s = 2\pi Lr_4 + 2(2\pi r_4^2)$$

**Ecuación 5.** Área superficial

$$R_{total} = R_{convL} + 2 R_{cond Prd} + R_{cond Aisl} + R_{conv ext}$$

**Ecuación 6.** Resistencia térmica total

Donde:

$U$ : Coeficiente global de transferencia de calor  $[\frac{W}{m^2 \cdot K}]$

$A_s$ ; Área de transferencia de calor [ $m^2$ ]

$L$ ; Altura del recipiente [m]

$r_4$ , Radio externo del recipiente [m]

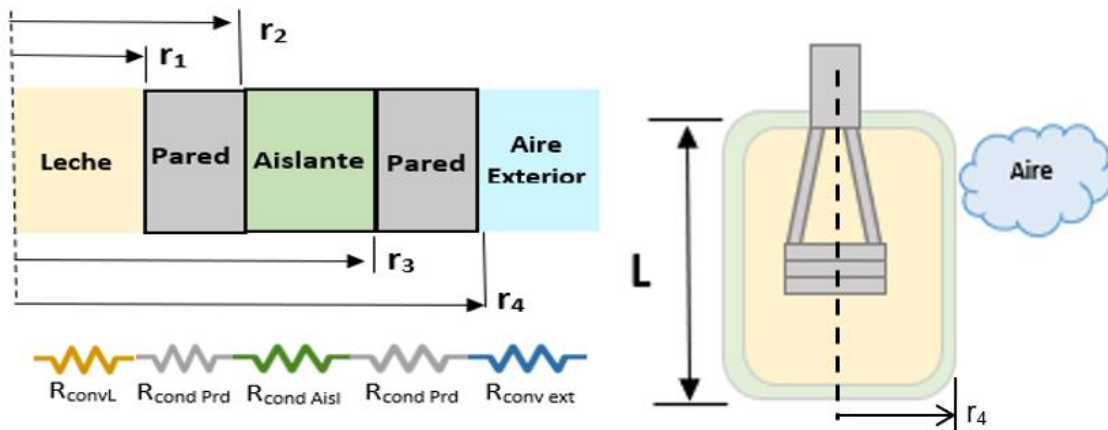
$R_{total}$ : Resistencia térmica total

$R_{convL}$  ; Resistencia térmica por convección de la leche

$R_{cond Prd}$  : Resistencia térmica por conducción de la pared

$R_{cond Aisl}$ : Resistencia térmica por conducción del aislante

$R_{conv ext}$ : Resistencia térmica por convección de exterior



**Figura 10.** Esquema de resistencias térmicas y diagrama de recipiente.  
**Fuente:** Elaboración propia.

En la Figura 10, se muestra un esquema de las resistencias térmicas consideradas y un diagrama del recipiente con sus respectivos radios para cada superficie considerada. Los radios representados corresponden a el radio de la superficie interna ( $r_1$ ), radio de la superficie interna con pared de acero ( $r_2$ ), el radio hasta las superficie del aislante ( $r_3$ ), el radio de la superficie externa del recipiente ( $r_4$ ). La Ecuación 7, emplea los valores antes mencionados para obtener la resistencia térmica total del recipiente.

$$R_{total} = \frac{1}{h_L 2\pi r_1 L} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi L k_p} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi L k_a} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi L k_p} + \frac{1}{h_a 2\pi r_4 L}$$

**Ecuación 7.** Resistencias térmicas

Donde:

$h_L$ : Coeficiente de transferencia de calor por convección de la leche [ $\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$ ]

$k_p$ : Coeficiente de conductividad térmica de la pared del recipiente [ $\frac{W}{mK}$ ]

$k_a$ : Coeficiente de conductividad térmica del aislante del recipiente [ $\frac{W}{mK}$ ]

$h_a$ : Coeficiente de transferencia de calor por convección del aire [ $\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$ ]

### **Cálculo del coeficiente de convección forzada de la leche**

Para calcular el coeficiente de convección de la leche ( $h_L$ ) es necesario calcular el número de Nusselt, Ecuación 8, para seleccionar la ecuación que se adapta a los parámetro establecidos se debe obtener el número de Reynolds, a partir de Ecuación 9, y el número de Prandtl, con la Ecuación 10, además de las propiedades termo físicas que se deben definir en función de la temperatura de película, Ecuación 11, las ecuaciones correspondientes se muestran a continuación.



$$Nu = \frac{h_L D_{int}}{k_L} = 0.0265 Re^{4/5} Pr^{1/3}$$

**Ecuación 8.** Número adimensional de Nusselt.

$$Re = \frac{VD_{int}}{\nu} = \frac{\rho VD_{int}}{\mu}$$

**Ecuación 9.** Número adimensional de Reynolds

$$Pr = \mu * \frac{C_p}{k_L}$$

**Ecuación 10.** Número adimensional de Prandtl

$$T_f = \frac{(T_s + T_\infty)}{2}$$

**Ecuación 11.** Temperatura de película

Donde:

$Nu$ : Numero adimensional de Nusselt

$k_L$ : Coeficiente de conductividad térmica de la leche [ $\frac{W}{mK}$ ]

$D_{int}$ : Diámetro interno del recipiente de leche [m]

$Re$ ; Número de Reynolds

$\nu$ ; Viscosidad cinemática [ $m^2/s$ ]

$V$ ; Velocidad de agitación [m/s]

$\mu$ ; Viscosidad dinámica de la leche [Pa s]

$Pr$ ; Número de Prandtl

$T_f$ : Temperatura de película [K]

$T_s$ : Temperatura superficial [K]

$T_\infty$ ; Temperatura ambiente, entrada de leche. [K]

Empleando la Ecuación 9, Ecuación 10 y Ecuación 11, se reemplaza los valores de las propiedades del fluido, que se obtienen considerando la temperatura de película  $T_f$ , además, el valor de la velocidad se toma en cuenta la velocidad de rotación del agitador, la cual es 46 rpm, lo que se traduce en una velocidad de 0,939 m/s.

### **Cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección natural.**

Para lograr determinar el coeficiente de convección libre ( $h_a$ ), se emplea la Ecuación 12, es necesario conocer la temperatura y las propiedades termo físicas del aire que se encuentra en los exteriores del recipiente de almacenamiento, para lo cual se toma como referencia los valores presentados por Incropera, (2017). Para calcular el número de Nusselt, se requiere el calcular previamente el número de Rayleigh, usando la Ecuación 13.

$$Nu_L = h_a * \frac{D_{ext}}{K_A} = 0.59 Ra^{1/4}$$

**Ecuación 12.** Número de Nusselt para convección libre flujo laminar

$$Ra = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)Vol}{v \alpha} = \frac{g(T_s - T_\infty)(2\pi r_4^2)L}{v \alpha T_f}$$

**Ecuación 13.** Número de Rayleigh

Donde:

$Nu_L$ : Numero de Nusselt para convección libre flujo externo

$k_A$ : Coeficiente de conductividad térmica del aire [ $\frac{W}{mK}$ ]

$D_{ext}$ : Diámetro externo del recipiente de leche [m]

$Ra$ : Número de Rayleigh

$g$ : Aceleración de la gravedad [ $m/s^2$ ]

$\beta$ : Coeficiente de expansión térmica [ $K^{-1}$ ]

$T_s$ : Temperatura superficial del recipiente [K]

$T_\infty$ : Temperatura externa (ambiente) [K]

$\alpha$ : Difusividad térmica del aire [ $\frac{m^2}{s}$ ]

$Vol$ : Volumen del recipiente de almacenamiento de leche [ $m^3$ ]

$r_4$ : Radio de la superficie externa del recipiente de leche [m]

$L$ : Longitud del recipiente [m]

### **Coeficiente de conductividad térmica del aislante y la pared del recipiente**

El recipiente de refrigeración y almacenamiento de leche posee paredes de acero inoxidable, con un coeficiente de 16,3 [ $\frac{W}{mK}$ ], y el coeficiente del aislante ( $k_a$ ) un rango de 0,026 – 0,036 [ $\frac{W}{mK}$ ], valor obtenidos de la revisión bibliográfica. (Incropera, DeWitt, Bergman, & Lavine, 2017) y (Martinez, 2020)

### **Coeficiente de desempeño y eficiencia energética del sistema (COP)**

Para este proyecto se emplea la Ecuación 14,

$$COP = \frac{Q_{evap}}{W_{comp}}$$

**Ecuación 14.** Coeficiente de desempeño del sistema.

Donde:

COP: Coeficiente de desempeño

$Q_{evap}$ : Flujo de calor hacia el evaporador. [W]

$W_{Comp}$ : Potencia del compresor [W]

### Modelacion en espacio de estado.

La Primera Ley de la termodinámica se expresa en la Ecuación 15; si consideramos un intervalo de tiempo se obtiene el balance del flujo de energía que entra y sale del sistema, que se define en la Ecuación 16; por lo tanto, en función de estas ecuaciones se establece la Ecuación 17.

$$E_{entrada} - E_{salida} = \Delta E_{sistema}$$

#### Ecuación 15. variación de energía de un sistema

Donde:

$\Delta E_{sistema}$ : variación de energía del sistema [kJ]

$E_{entrada}$ : Energía de entrada al sistema [kJ]

$E_{salida}$ : Energía de salida del sistema [kJ]

$$\dot{E}_{entrada} - \dot{E}_{salida} = \frac{\Delta E_{sistema}}{dt}$$

#### Ecuación 16. Balance de energía de entra y salida.

Donde:

$\dot{E}_{entrada}$ : Flujo de energía de entrada al sistema [kW]

$\dot{E}_{salida}$ : Flujo de energía de salida del sistema [kW]

$$\Delta E_{sistema} = m C_p \Delta T$$

$$\frac{d(\Delta E_{sistema})}{dt} = m * C_p * \frac{d(\Delta T)}{dt} \quad (kW)$$

#### Ecuación 17. Flujo de energía al sistema.

Considerando el flujo masico constante en la **Ecuación 17** se puede expresar de la siguiente forma:

$$\frac{d(\Delta T)}{dt} = \frac{1}{mC_p} * Potq - \frac{1}{mC_p} * Perd * \Delta T$$

#### Ecuación 18. Razón de variación de temperatura en el tiempo

$$Perd = \sum U_i \cdot A_i = U * As$$

#### Ecuación 19. Pérdidas del sistema.

Para obtener el valor de pérdidas del sistema, se aplica la Ecuación 19, para lo cual es necesario considerar todas las superficies del equipo, por lo tanto, se multiplicará el coeficiente global de transferencia de calor por el área superficial del contenedor de leche. Además, para lograr determinar un valor aceptable de potencia de refrigeración es necesario aplicar un factor de seguridad del 25% de la carga total calculada, empleando la Ecuación 20.

$$Potq = 1,25 * Q$$

**Ecuación 20.** Potencia de refrigeración necesaria

Donde:

Perd: Pérdidas del equipo [W]

U: Coeficiente global de transferencia de calor [W/Km<sup>2</sup>]

As: Área superficie de contenedor [m<sup>2</sup>]

m: Masa del producto a refrigerar [kg] (103 kg de leche)

Cp: Calor específico de la leche [ $\frac{J}{kg^{\circ}C}$ ] (3.89 kJ/kg °C)

Potq: Potencia calórica necesaria para enfriar [W]

T: Tiempo de enfriamiento (establecido) [s]

$\Delta T$ : Variación de temperatura [°C]

Te: temperatura de entrada de la leche (26 [°C])

Ts: Temperatura de enfriamiento del producto (2 [°C])

**Modelación del proceso de enfriamiento.**

En la Ecuación 21, se presenta las matrices del modelo matemático cerrado en espacio de estado.

$$[\dot{\Delta T}] = \left[ \frac{-perd}{mCp} \right] [\Delta T] + \left[ \frac{1}{mCp} \right] [Potq]$$

$$[y] = [1][\Delta T] + [0][Potq]$$

**Ecuación 21.** Modelo matemático en espacio de estado del sistema

### 3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 3.1 Datos para el desarrollo de la simulación.

##### Características del sistema de refrigeración de refrigeración

Para el presente estudio se establecerán los siguientes datos de entrada:

- Tipo de refrigeración: En tanque con equipo de refrigeración por inmersión.
- Capacidad de refrigeración: 100 litros de leche cruda
- Dimensiones del recipiente: 0,81 [m] de diámetro y 0,8 [m] de profundidad
- Capacidad máxima de 300 litros de leche cruda
- Potencia eléctrica del equipo de refrigeración por inmersión: 1,5 [kW]
- Potencia promedio de refrigeración (ISO 5708): 3750 [W]
- Velocidad del mezclador: 45 [rpm]
- Dimensiones del evaporador: 0,39 [m] de diámetro y 0,21 [m] de largo.
- Cantidad de leche enfriada en 1 hora: 90-105 litros
- Coeficiente de conductividad térmica de paredes (acero inoxidable):  $16.3 \left[ \frac{W}{m^{\circ}C} \right]$
- Coeficiente de conductividad del aislante (Poliuretano expandido):  $0,032 \left[ \frac{W}{m^{\circ}C} \right]$

Dimensiones de las superficies para cada componente de la pared del recipiente.

- El radio de la superficie interna ( $r_1$ ): 345 [mm]
- El radio de la superficie interna con pared de acero ( $r_2$ ): 355 [mm]
- El radio hasta las superficie del aislante ( $r_3$ ): 395 [mm]
- El radio de la superficie externa del recipiente ( $r_4$ ): 405 [mm]

##### Características del producto a refrigerar (leche cruda)

- Temperatura de refrigeración de leche cruda: 4 [°C]
- Temperatura de leche cruda a la entrada: 32 [°C]
- Densidad: 1 030 [kg/m<sup>3</sup>]
- Coeficiente de conductividad térmica:  $0.53 \left[ \frac{W}{m^{\circ}C} \right]$
- Viscosidad dinámica:  $0,0022 \left[ \frac{kg}{m*s} \right]$
- Calor específico:  $3,89 \left[ \frac{kJ}{kg^{\circ}C} \right]$
- Cantidad de leche a refrigerar en 1 hora: 0,1 [m<sup>3</sup>]
- Tiempo establecido para enfriamiento: 3600 [s]

### Propiedades termo físicas del ambiente (aire).

En función a una temperatura de referencia se debe definir las propiedades del aire exterior del recipiente, esta temperatura se define como el promedio entre la temperatura superficial del recipiente y la temperatura del aire. Por lo tanto, la temperatura de película es 286,15 [K], de acuerdo con la bibliografía investigada en las tablas anexas del texto de Incropera, DeWitt, Bergman, & Lavine (2017), se encuentran las propiedades del aire por lo cual se procede a interpolar los valores necesarios.

- Coeficiente de conductividad térmica del aire:  $0,2518 \left[\frac{W}{mK}\right]$
- Aceleración de la gravedad:  $9,81 [m/s^2]$
- Coeficiente de expansión térmica:  $0,00345[K^{-1}]$
- Temperatura externa (ambiente):  $295 [K]$
- Difusividad térmica del aire:  $20.65 \times 10^{-6} [m^2/s]$
- Viscosidad cinemática  $14.64 \times 10^{-6} [m^2/s]$

### Valores necesarios calculados preliminarmente.

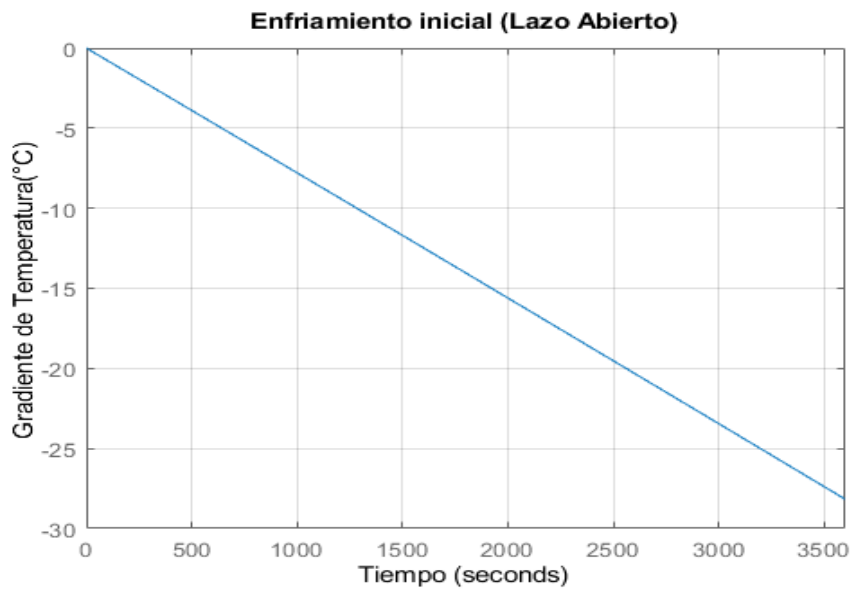
Para una adecuada simulación y análisis computacional se requiere establecer los parámetros operacionales iniciales, los cuales se calcularon empleando el Anexo III, en la Tabla 2, se mencionan los valores referenciales para el desarrollo del programa de control automático.

**Tabla 2.** Valores referenciales de los parámetros del sistema de refrigeración.

Parámetro	Valor
Masa de leche	103 [kg]
Calor necesario de refrigeración	11 218 760[J]
Potencia de refrigeración	3 116,3 [kW]
Coeficiente de transferencia de calor por convección forzada (leche)	$1238.8 \left[\frac{kW}{m^2 \cdot K}\right]$
Coeficiente de transferencia de calor por convección libre del aire	$6,09 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$
Resistencia térmica total	$0,7459 \left[\frac{K}{W}\right]$
Área superficial	4,095 [m <sup>2</sup> ]
Coeficiente global de transferencia de calor	$0,3274 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$
COP del equipo de refrigeración por inmersión (Fabricante)	2,5
Perdidas del sistema de refrigeración	37,54 [W]
Potencia calórica total de refrigeración	3 944,2 [W]

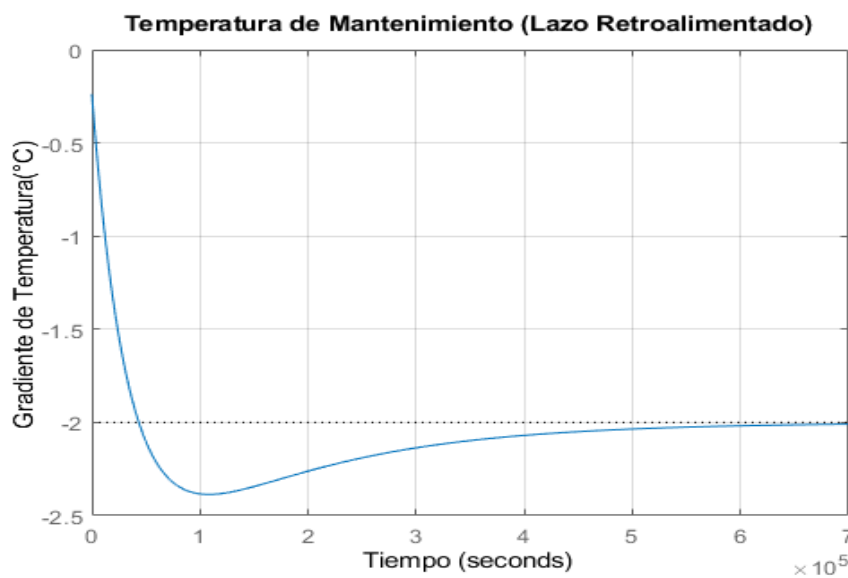
**Nota:** Elaboración propia

En el proceso de refrigeración se inicia con un con disminución de la temperatura de entrada de la leche cruda de 32 °C a 4°C, esto se puede llevar a cabo con un instrumento como un termostato. Para el desarrollo del análisis de sensibilizada es necesario emplear los valores nominales presentados previamente en la **Tabla 2**, a continuación, en la **Figura 11** y **Figura 12**, se muestran la respuesta temporal en lazo abierto y lazo retroalimentado de la simulación de sistema de refrigeración, empleando los valores referenciales, para lo cual se empleó el código descrito en el Anexo IV.



**Figura 11.** Respuesta temporal del sistema de refrigeración en lazo abierto.

**Fuente:** Elaboración propia



**Figura 12.** Respuesta temporal del sistema de refrigeración en lazo cerrado.

**Fuente:** Elaboración propia

### Parámetros principales del sistema para su optimización

Para lograr optimizar el sistema de refrigeración es necesario determinar los parámetros de funcionamiento que se puedan modificar, en la **Tabla 3**, se muestran los valores máximos y mínimos posibles, para proceder a realizar el análisis correspondiente. Los valores para la temperatura de refrigeración y el tipo de aislante se definen previamente por las referencias bibliográficas, el volumen de leche cruda se establece de acuerdo con la capacidad del recipiente seleccionado (ANEXO II), el tiempo de enfriamiento es establecido por el autor en función a la bibliografía.

**Tabla 3.** Parámetros convenientes para la optimización de un sistema de refrigeración.

Parámetro	Unidades	Mínimo	Máximo	Nominal
Temperatura de refrigeración (leche)	[°C]	2	6	4
Tiempo de enfriamiento inicial	[s]	1800	7200	3600
Volumen por refrigerar de leche	[L]	50	300	100
Tipo de aislante (Poliuretano)	[W/mK]	0,026	0,036	0,032

**Nota:** Elaboración propia

### 3.2 Análisis de sensibilidad de parámetros para optimización.

Los porcentajes de variación de los parámetros principales de la refrigeración se miden en función a los valores obtenidos teniendo en cuenta los parámetros nominales, establecidos en la **Tabla 2**, y los valores máximos y mínimos posibles, detallados en la **Tabla 3**. En las tablas continuación, se detallan los porcentajes obtenidos al variar la temperatura de refrigeración, el tiempo de enfriamiento inicial, el volumen de leche, el coeficiente de conductividad térmica del aislante.

#### Temperatura de refrigeración (leche)

En la **Tabla 4** se recopilan los porcentajes de variación en función del valor mínimo y máximo de temperatura, de los valores obtenidos, se puede determinar los valores óptimos, entre los cuales se destacan el COP del equipo el cual aumenta en un 12,7% con un valor mínimo de temperatura, en cambio las pérdidas del sistema se reducen un 7,45% y el COP 2,34% cuando se evalúa el sistema con valor máximo de temperatura.



**Tabla 4.** Porcentaje de variación de parámetros del sistema en función a la temperatura de refrigeración mínima y máxima.

<b>Parámetro</b>	<b>% Mínimo</b>	<b>% Máximo</b>
Masa de leche [kg]	0	0
Calor necesario de refrigeración [kJ]	7.143	-7,143
Potencia calórica de refrigeración [kW]	7.144	-7,142
Coeficiente de transferencia de calor por convección forzada (leche) [W/m <sup>2</sup> K]	0	0
Coeficiente de transferencia de calor por convección libre del aire [W/m <sup>2</sup> K]	2.7586	-2,99
Resistencia térmica total [K/W]	-0,29	0,33
Coeficiente global de transferencia de calor [W/m <sup>2</sup> K]	0,29	-0,33
COP del equipo de refrigeración por inmersión	12,7	-2.34
Perdidas del sistema de refrigeración [W]	7.46	-7,45

**Nota:** Elaboración propia

### Tiempo de enfriamiento inicial

Al reducir o aumentar el tiempo de enfriamiento inicial se obtiene un porcentaje de variación en los parámetros del sistema de refrigeración, los valores obtenidos se muestran en la Tabla 5. Con un tiempo mínimo se obtiene un incremento del 109% en el COP y con un tiempo máximo se obtiene una reducción del 46,8% del COP y 50% en la potencia de refrigeración.

**Tabla 5.** Porcentaje de variación de parámetros del sistema en función del tiempo de refrigeración inicial mínimo y máximo.

<b>Parámetro</b>	<b>% Mínimo</b>	<b>% Máximo</b>
Masa de leche [kg]	0	0
Calor necesario de refrigeración [kJ]	0	0
Potencia calórica de refrigeración [kW]	100	-49,99
COP del equipo de refrigeración por inmersión	109,05	-46,8
Perdidas del sistema de refrigeración [W]	0	0
Potencia de refrigeración [W]	100	-50

**Nota:** Elaboración propia

## Volumen por refrigerar de leche

Los valores presentados en la Tabla 6, se han obtenido al evaluar los parámetros de refrigeración teniendo en cuenta el volumen de leche por refrigerar, mínimo y máximo. Cuando se considera un volumen mínimo se logra una reducción del 50% en la potencia de refrigeración y 46,76% del COP, por otro lado, al evaluar el sistema con un volumen máximo se obtiene un incremento de 200% en la potencia de refrigeración necesaria y de 212,93% del COP.

**Tabla 6.** Porcentaje de variación de parámetros del sistema de refrigeración en función del volumen de leche mínimo y máximo.

Parámetro	% Mínimo	% Máximo
Masa de leche [kg]	-50	200
Calor necesario de refrigeración [kJ]	-50	200
COP del equipo de refrigeración por inmersión	-46,76	212,93
Perdidas del sistema de refrigeración [W]	0	0
Potencia de refrigeración [W]	-50	200

**Nota:** Elaboración propia

## Tipo de aislante (Poliuretano)

En la Tabla 7 se presentan los porcentajes de variación de los parámetros de refrigeración en función del coeficiente conductividad térmica del aislante, se puede observar que para un valor mínimo del coeficiente se obtiene un aumento de 20,5% de la resistencia térmica total, 4,96% del COP y una reducción del 17% de las pérdidas del sistema, también al evaluar el sistema con un valor máximo de coeficiente de conductividad del aislante se consigue un incremento del 10,9% en las pérdidas del sistema, 5,32% del COP y una disminución del 9.89% de la resistencia térmica total.

**Tabla 7.** Porcentaje de variación de parámetros del sistema de refrigeración en función del coeficiente de conductividad térmica mínimo y máximo.

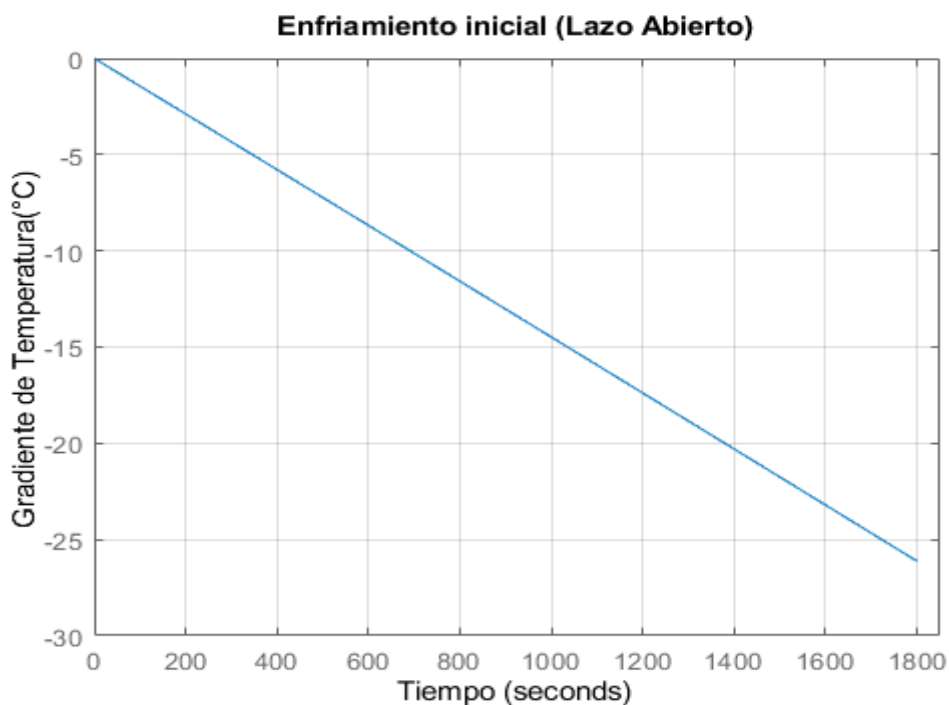
Parámetro	% Mínimo	% Máximo
Masa de leche [kg]	0	0
Calor necesario de refrigeración [kJ]	0	0
Potencia calórica de refrigeración [kW]	0	0
Resistencia térmica total [K/W]	20,545	-9,89
Coefficiente global de transferencia de calor [W/m <sup>2</sup> K]	-17,04	10,981
COP del equipo de refrigeración por inmersión	4,96	5,32
Perdidas del sistema de refrigeración [W]	-17,05	10,979

**Nota:** Elaboración propia

De los valores obtenidos previamente se puede establecer los parámetros adecuados para lograr la optimización del sistema, por lo tanto, se define la temperatura máxima de 6°C, el tiempo de enfriamiento inicial mínimo de 0,5 horas, volumen mínimo de 50 litros de leche c, coeficiente de conductividad térmica del aislante mínimo de 0,0026 [W/m K].

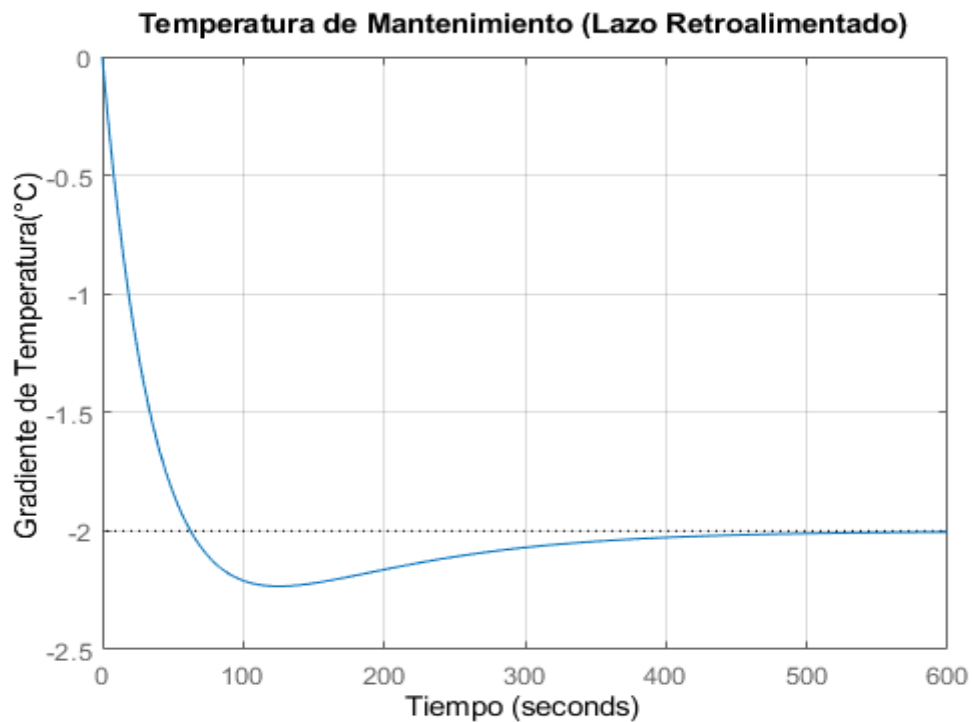
### 3.3 Sistema de refrigeración optimizado

Para lograr un mejor rendimiento del equipo de refrigeración es necesario reducir el tiempo de funcionamiento del compresor, por lo cual se aplica un rango de tiempo de referencia para lograr el enfriamiento inicial, al definir los valores optimizados estos reemplazan a los valores iniciales, por lo cual se establece un tiempo de media hora para disminuir la temperatura de 50 litros de leche cruda hasta los 6°C, usando un aislante con un coeficiente de conductividad térmica de 0,036 [W/m K], teniendo en cuenta estos valores se realiza la simulación, obteniendo la respuesta del sistema optimizado, los valores en la **Tabla 8**, y la respuesta temporal en lazo abierto en la Figura 13, se muestra el enfriamiento inicial en lazo abierto, y en la Figura 14, se puede observar la respuesta temporal del sistema optimizado de refrigeración en lazo retroalimentado, para lo cual se consideró una variación de 2°C en la temperatura de mantenimiento.



**Figura 13.** Respuesta temporal del sistema optimizado de refrigeración en lazo abierto.

**Fuente:** Elaboración propia



**Figura 14.** Respuesta temporal del sistema optimizado en lazo cerrado.  
**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 8.** Valores de los parámetros optimizados del sistema de refrigeración.

Parámetro	Valor
Masa de leche	51,5 [kg]
Calor necesario de refrigeración	5 208,7 [kJ]
Potencia de refrigeración	2 893,7 [W]
Coeficiente de transferencia de calor por convección forzada (leche)	1238,8 $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$
Coeficiente de transferencia de calor por convección libre del aire	5,91 $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$
Resistencia térmica total	0,6746 $\left[\frac{K}{W}\right]$
Área superficial	4,095 [m <sup>2</sup> ]
Coeficiente global de transferencia de calor	0,362 $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$
COP del equipo de refrigeración por inmersión	3,29
Perdidas del sistema de refrigeración	38,54 [W]
Potencia total de refrigeración	3,667 [kW]

**Nota:** Elaboración propia

En la **Tabla 8**, se puede observar que, al emplear los valores optimizados definidos en el análisis de sensibilidad, el calor de refrigeración del producto se redujo a la mitad, la resistencia térmica se redujo un 9% y el coeficiente global de transferencia de calor aumento un 10%. Considerando que la masa de leche a ser enfriada que inicialmente tenía un valor de 103 kg, al optimizar los parámetros se ha identificado la necesidad de disminuir dicha masa hasta los 51,5 kg, que sigue siendo una cantidad dentro del rango requerido por los productores lácteos, esto produce una disminución del 25% en la potencia total de refrigeración, por otro lado, se puede observar que el COP aumenta un 31%, por lo tanto, se puede concluir que el sistema se logró optimizar. Para la optimización del sistema se utilizó el código mencionado en el Anexo V.

### 3.4 Conclusiones

Al analizar un sistema de refrigeración solar se determinan los parámetros que intervienen directa e indirectamente en su funcionamiento, de los cuales se puede identificar los que influyen de forma representativa, y se procede con el proceso de optimización del sistema, variando los valores de los parámetros más sensibles como el tiempo de enfriamiento inicial, la cantidad de leche, la temperatura de mantenimiento y el tipo de aislante, logrando determinar los valores óptimos de estos parámetros que determinan una mejor eficiencia energética en el sistema,

Por lo tanto, se ha cumplido con los objetivos general y específicos, optimizando un sistema de refrigeración solar, empleando un enfoque mecatrónico, con lo que se ha mejorado el rendimiento del proceso termodinámico y térmico, con lo que se mejorara las condiciones de los productores de lácteos de la parroquia de Lloa.

Se concluye también que el análisis y síntesis de los procesos termodinámicos, utilizando un enfoque holístico y sinérgico como lo determina la ingeniería mecatrónica es muy ventajoso para clarificar y estructurar la problemática de los sistemas térmicos y termodinámicos; por tanto, conseguir la optimización de los parámetros funcionales de estos sistemas.

El proyecto de refrigeración solar se enfoca también en disminuir el consumo energético de un equipo de refrigeración de leche, comparando el control automático digital en lazo abierto mediante el uso de un termostato con el control analógico PID en lazo retroalimentado, determinando que el uso del termostato simplifica el control y operación del proceso de refrigeración solar, pero con un gradiente de temperatura que puede afectar en las propiedades de la leche; mientras que el control PID, aunque es más complejo modula la temperatura de la leche fría con gradientes fraccionarios, lo que mejora la precisión y mantiene la temperatura prácticamente constante.

Al optimizar el sistema se puede concluir que se disminuye el consumo de energía eléctrica, ya que el panel fotovoltaico provee al compresor de la energía requerida para su funcionamiento, esto minimiza el costo de funcionamiento del sistema produciendo un ahorro, lo que permite amortizar la inversión, por lo tanto, el sistema de refrigeración solar optimizado influye de forma representativa en la rentabilidad del uso de sistemas fotovoltaicos e híbridos(fotovoltaico-térmico).

### **3.5 Recomendaciones**

De la investigación que se ha realizado y del estado del arte inicial se establece que se puede optimizar aún más con el uso de un sistemas de refrigeración solar híbridos, que además de un panel fotovoltaico, que suministra energía al compresor y otros equipos del ciclo, disponga de un panel solar térmico, que mejoraría la exergía en el proceso de condensación del refrigerante, aumentando la eficiencia energética del sistema, por lo tanto se recomienda continuar la investigación de aplicaciones de sistemas de refrigeración solar en las industrias del país.

Además de los parámetros utilizados para la optimización se pueden investigar otros factores que mejoren el rendimiento del sistema de refrigeración, de acuerdo con el presente proyecto se puede mencionar algunos de los parámetros más influyentes en el sistema, entre los cuales se encuentra el material del recipiente, el tipo y espesor del aislante, estos factores afectan directamente en las pérdidas producidas por el recipiente.

En el presente proyecto se establece que un panel fotovoltaico provee de energía eléctrica al equipo de refrigeración, la eficiencia de los módulos fotovoltaicos depende de la calidad y del tiempo de vida útil del panel, ya que los componentes del panel tienden a degradarse en función del tiempo de funcionamiento, se puede optimizar la energía producida por el panel al considerar una degradación anual y dependiendo de esta, determinar los sistemas fotovoltaicos más adecuados para esta aplicación.

Para realizar la selección de los equipos que componen el sistema de refrigeración solar, se recomienda establecer las condiciones extremas de funcionamiento, para lograr optimizar el sistema de refrigeración, además se pueden variar los parámetros de selección de los componentes, dando paso a una próxima investigación.

Para posteriores investigaciones se recomienda identificar las condiciones adecuadas en el país, para la aplicación de sistemas de alimentación de energía eléctrica con paneles fotovoltaicos y térmicos, ya que esto puede beneficiar a los principales sectores económicos del Ecuador.

## 4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Aguera, J. (2014). *Termodinámica Lógica y Motores Térmicos*. España.
- Ambarita, H., & Kawai, H. (2016). *Experimental study on solar-powered adsorption refrigeration cycle with activated alumina and activated carbon as adsorbent. Case Studies in Thermal Engineering*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/J.CSITE.2016.01.006>
- ASHRAE. (2017). *CONDICIONES DE DISEÑO CLIMÁTICO ASHRAE 2009/2013/2017*. Obtenido de <http://ashrae-meteo.info/v2.0/index.php>
- Aulestia, L., & Celi, M. (2017). *Implementación de un sistema de paneles solares fotovoltaicos con capacidad de 20 kW/mes para ser utilizados en instalaciones industriales*. Quito.
- Bohorquez, C., Guillén, R., Imbert, J., & Hernández, J. (2020). Determinación de la adsorción y desorción de pares zeolita-metanol en un ciclo de enfriamiento. *Cujae*.
- Borgnakke, C. &. (2013). *Fundamentals of thermodynamics*.
- Cacuango, E., & Santafé, E. (2011). *Evaluación de Queso fresco elaborado con dos contenidos de humedad, dos métodos de salado, empacados al vacío utilizando dos espesores de envases*. Obtenido de <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/390>
- Çengel, Y. A. (2015). *Termodinámica*. . McGraw-Hill.
- Consultora Morales. (2019). *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial de la parroquia rural de Lloa 2015-2019*. Quito.
- Hernandez, J. (s.f.). *La refrigeración de la leche*. Obtenido de [https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd\\_1975\\_04-05.pdf](https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1975_04-05.pdf)
- Incropera, F., DeWitt, D., Bergman, T., & Lavine, A. (2017). *Introduction to heat transfer*. Wiley.
- INCSolar. (2021). *SISTEMA INTERCONECTADO A LA RED Y ASILADO, ¿CUÁL ES LA DIFERENCIA?* Obtenido de <https://incsolar.com.mx/blog/sistema-interconectado-a-la-red-y-asilado-cual-es-la-diferencia/>
- Kreith, F. M. (2012). *Principios de transferencia de calor*. CENGAGE Learning.
- Martinez, M. (2020). *Guía de ventajas y soluciones de espuma rígida de poliuretano proyectado e inyectado para aislamiento térmico, acústico e impermeabilización, conforme al CTE*. Madrid: AISLA.
- Moreno, F., Bandarra, E., & Guevara, D. (2017). Diseño y evaluación de un sistema de refrigeración experimental trabajando por adsorción solar. *Revista chilena de ingeniería*.
- Nieto Carlier, R. G. (2014). *Termodinámica*. . Dextra Editorial.
- NTE INEN 9 . (2015). *Leche cruda, requisitos*. Instituto Ecuatoriano de Normalización.



- Ordoñez, F., & Vaca, D. (2019). *Mapa Solar del Ecuador 2019*. Obtenido de [https://www.ingenieriaverde.org/wp-content/uploads/2020/01/Mapa\\_Solar\\_del\\_Ecuador\\_2019.pdf](https://www.ingenieriaverde.org/wp-content/uploads/2020/01/Mapa_Solar_del_Ecuador_2019.pdf)
- PLEVNIK. (2019). *Jarra de transporte*. Obtenido de <https://www.plevnik.eu/si/izdelek/prevozni-vrc-fv/>
- Plevnik. (2019). *Refrigeradores de inmersión HM*. Obtenido de <https://www.plevnik.eu/si/izdelek/potopni-hladilci-hm/>
- PROViento S.A. (s.f.). *COMBOS SOLARES*. Obtenido de <https://proviento.com.ec/combos-solares/354-combo3-sistema-mediana-para-casa-de-campo-a-12vdc.html>
- Valle, J., Nieto, R., Morales, A., & Enrique, E. (2017). *Análisis energético de un siste de refrigeracion solar por absrción*. Obtenido de [www.ecorfan.org/bolivia](http://www.ecorfan.org/bolivia)

## 6. ANEXOS

### ANEXO I

Condiciones de diseño climático ASHRAE 2017, Parque Bicentenario de Quito, Ecuador.

Manual ASHRAE 2017 - Fundamentos (SI)															
PARQUE BICENTENARIO DE QUITO, ECUADOR ( OMM : 840710)															
Latitud: 0.141S		Largo: 78.488W		Elevación: 2813		Estándar: 71,79			Zona horaria: -5.00		Período: 90-13		WBAN : 99999		
Condiciones de diseño de calefacción y humidificación anuales															
mes más frío	DB de calefacción		Humidificación DP / MCDB y HR						Mes más frío WS / MCDB				MCWS / PCWD a		
			99,6%			99%			0,4%		1%		99,6% DB		
	99,6%	99%	DP	HORA	MCDB	DP	HORA	MCDB	SW	MCDB	SW	MCDB	MCWS	PCWD	
11	6.8	7.3	-0.2	5.3	14.8	1.0	5.7	14.5	8.6	17.4	7.9	17.5	0.5	330	
Condiciones anuales de diseño de enfriamiento, deshumidificación y entalpía															
Mes más caliente	Rango DB del mes más caluroso	Refrigeración DB / MCWB						Evaporación WB / MCDB						MCWS / PCWD a 0.4% DB	
		0,4%		1%		2%		0,4%		1%		2%			
		base de datos	MCWB	base de datos	MCWB	base de datos	MCWB	WB	MCDB	WB	MCDB	WB	MCDB	MCWS	PCWD
8	10.4	21.9	11.8	21.1	11.9	20.8	11.9	14.5	18.8	14.1	18.4	13.7	18.0	3.8	140
Deshumidificación DP / MCDB y HR															
0,4%			1%			2%			0,4%		1%		2%		Extremo Max WB
DP	HORA	MCDB	DP	HORA	MCDB	DP	HORA	MCDB	Enth	MCDB	Enth	MCDB	Enth	MCDB	
13.0	13.3	16.0	12.4	12.7	15.1	12.2	12.5	14.8	51.7	19.0	50.3	18.5	49.2	18.2	19.0
Condiciones de diseño anuales extremas															
WS anual extremo			Temperatura anual extrema				Valores del período de retorno de n años de temperatura extrema								
			Significar		Desviación Estándar		n=5 años		n=10 años		n=20 años		n=50 años		
1%	2,5%	5%	mínimo	máx.	mínimo	máx.	mínimo	máx.	mínimo	máx.	mínimo	máx.	mínimo	máx.	
7.7	6.8	6.0	base de datos	3.7	24.4	1.3	1.6	2.8	25.5	2.1	26.4	1.4	27.3	0.5	28.4
			WB	2.2	16.0	1.4	1.0	1.1	16.7	0.3	17.3	-0.5	17.9	-1.5	18.6

## ANEXO II

Catálogo de recipientes y enfriadores por inmersión de leche marca PLEVNIK.

### Portable tank - container type FV 200 - 580

#### Description and basic equipment:

The portable container (FV) is entirely made of **stainless steel** W.Nr.1.4301 and is **insulated** with an environmentally safe polyurethane foam without CFC.



FV 200 – 580 I

Container type	Volume (l)	Dimensions (mm)		Weight (kg)	Code	Delivery	Type and width / length of trolleys and trailers (recommended combinations with containers)			
		Diameter - outside (mm)	Depth (mm)				RF 1	TF 2-6	TRF 3-10	PF 3-10
FV 200	200	650	800	61	4.002.02		1100/1900	670/750	/	/
FV 300	300	810	800	76	4.002.04		1300/1900	840/1050	1250/1600	1500/2050
FV 400	400	810	1000	85	4.002.05		/	840/1050	1250/1600	1500/2050
FV 450	470	960	800	98	4.002.07		/	980/1050	1250/1600	1550/2150
FV 580	580	960	1000	108	4.002.08		/	980/1050	1250/1600	1550/2150

Milk cooling and farm equipment

### Immersion cooler type HM

#### Description and basic equipment:

- the new type of evaporator allows the use of an environmentally safe cooling mean.
- the welded cooling body with a small volume needs a smaller quantity of cooling mean and it's easier to maintain.
- automatic control of operation of the cooling device gives us the most efficient cooling of the milk in different ambient temperatures.
- the specially designed stirrer is efficient even with small quantities of milk.
- because to the big surface of the cooling body the cooling time shortens and the energy consumption is reduced



Immersion cooler type	HM 202 K	HM 202 D	HM 302 K	HM 302 D	HM 402 K	HM 402D	HM 502 K	HM 502 D
Diameter of the evaporator (mm)	390	390	390	390	390	390	390	390
Power supply V-50Hz	230	230	230 (400)	230 (400)	400	400	400	400
Thermal switch of the compressor	/	/	*	*	*	*	*	*
Pressure protection of the comp.	/	/	*	*	*	*	*	*
Electrical power (kW)	1,1	1,1	1,5	1,5	1,9	1,9	2,5	2,5
Average cool. power (ISO 5708)(W)	2700	2700	3750	3750	4560	4560	6260	6260
Quantity of milk (l) cooled in 1h	70 - 80	70 - 80	90 - 105	90 - 105	115 - 130	115 - 130	130 - 150	130 - 150
Stirrer speed (rpm)	46	46	46	46	46	46	46	46
Height of the evaporator (mm)	130	130	210	210	210	210	270	270
Weight of the evaporator (kg)	12	12	15	15	15	15	16	16
Cooler height (mm)	800	1000	800	1000	800	1000	800	1000
Height of the casing (mm)	440	440	480	480	480	480	580	580
Width of the casing (mm)	560	560	680	680	680	680	680	680
Depth of the casing (mm)	370	370	540	540	540	540	730	730
Weight - total (kg)	67	67	79	79	88	88	102	102
Code	4.002.31	4.002.32	4.002.33	4.002.34	4.002.35	4.002.36	4.002.37	4.002.38

#### Additional equipment:

Equipment	Code
Recuperation of waste energy (for HM 302, HM 402 in HM 502) without the water container	4.003.31

## ANEXO III

Código para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor.

```
%Calculo del Coef. Global de trans. de calor para un recipiente
contenedor
%de leche cruda
clear all;
clc
Vleche=0.05; %volumen de leche a refrigerar en [m3]
dleche=1030;% densidad de leche [kg/m3]
Cpl=3890; %calor especifico leche [J/kg*K]
Te=32+273; %temp de entrada de leche [K]
Ts=6+273;%tempe de supf refrigeracion [K]
t=1800;%tiempo establecido de refrigeración [s]
%POTENCIA CALORICA
ml=Vleche*dleche %masa de leche a refrigerar [kg]
q=ml*Cpl*(Ts-Te) %calor de refrigeracion [J]
Q=q/t % Potencia calorica de refrigeracion [W]
%CARGAS TERMICAS
de=0.39; %diametro del evaporador [m]
Lr=0.8;%Longitud del recipient [m]
kp=16.3;%Coeficiente de conductividad térmica de paredes (acero
inoxidable) [W/mK]
ka=0.036;% Coeficiente de conductividad térmica del aislante
(Poliuretano) [W/mK]
r1=0.345;%radio de la superficie interna [m]
r2=0.355;%radio de la superficie interna con pared de acero [m]
r3=0.395;%radio hasta las superficie del aislante [m]
r4=0.405;% radio de la superficie externa del recipiente [m]
%CALCULO DE RESISTENCIA TERMICA TOTAL
%calculo de Coeficiente de transferencia de calor por convección de
leche
kl=0.53 ;%Coeficiente de conductividad térmica[W/mK]
Vagitador= (46*2*3.1416*(de/2))/60; %Velocidad del agitador 46rpm
[m/s]
visdl=0.0022 ;%Viscosidad dinámica de la leche [kg/m*s]
Cpl=3890;%Calor especifico leche [J/kg*K]
Tf=(Te+Ts)/2; %temp de pelicula [K]
Re=(dleche*Vagitador*2*r1)/visdl;% numero de Reynolds
Pr1=visdl*Cpl/kl;%numero de prandtl de leche
Nul=0.0265*(Pr1^0.33)*(Re^0.8);%Numero de Nusselt de la leche
hL=Nul*kl/(2*r1)%coef. de trans. de calor por conveccion de leche
[W/m2K]

%calculo de Coeficiente de transferencia de calor por convección del
aire
g=9.81; %aceleracion de la gravedad [m/s2]
Tinf=22+273;%Temperatura del medio [K]
Tfa=(Ts+Tinf)/2;% Temperatura de pelicula [K]
kaire=0.2518;% Coeficiente de conductividad térmica del aire [W/mK]
difaire=20.65*(10^(-6));% Difusividad térmica del aire [m2/s]
viscin=14.64*(10^(-6));% Viscosidad cinematica [m2/s]
Ra=(g*2*3.14*r4*r4*Lr*(Tinf-Ts))/(viscin*difaire*Tfa);%Numero de
Rayleight
Nua=0.59*Ra^(1/4);%Numero de Nusselt del aire
ha=Nua*kaire/(2/r4)% Coef. de Trans. de calor por conveccion
natural. [W/m2K]

%Resistencias termicas
```

```

Rcl=1/(hL*2*3.14*r1*Lr);%resistencia por convec. leche
Rcpi=(log(r2/r1))/(2*3.14*Lr*kp);% resistencia por conduc. pared
interna [K/W]
Rcpe=(log(r4/r3))/(2*3.14*Lr*kp);% resistencia por conduc. pared
externa [K/W]
Rcais=(log(r3/r2))/(2*3.14*Lr*ka);% resistencia por conduc. del
aislante [K/W]
Rca=1/(ha*2*3.14*r4*Lr);%resistencia por convec. libre aire [K/W]
Rtotal=Rcl+Rcpi+Rcais+Rcpe+Rca %Resistencia termica total[K/W]

%CALCULO DE COEF. GLOBAL DE TRANSF. DE CALOR
As=(2*3.14*r4*Lr)+(4*3.14*r4*r4);%Area superficial del recipiente[m2]
U=1/(As*Rtotal)%Coef. global de trans. de calor [W/m2K]

%Cálculo de la Potencia del evap. y perdidas.
potq=Q % Potencia frigorífica total [W] = Q
Perdidas=(U*As) % pérdidas por deltaT unitario en W/K
per=(U*As*(Ts-Te))
%COP Teorico
COPi=2.5;%COP teorico
Qref=-1.3*(potq+per)% flujo de calor total de refrigeración [W]
Wcomp=-potq/COPi %Potencia de trabajo del compresor
%wcomp=1500; %potencia de refrigeración catalogo
COP=Qref/Wcomp %COP calculado

%CALCULO DEL PORCENTAJE DE VARIACION
mli=103;%Valor inicial de masa de leche
qi=-11218760; %Valor inicial del calor de refrigeracion
Qi=-3116.3;%Valor inicial de la potencia de refrigeracion
hLi=1238.8;%Valor inicial del coef. de conveccion de la leche
hai=6.0933;%Valor inicial del coef. de conveccion natural del aire
Rtotali=0.7459;%Valor inicial de la resistencia termica total
Ui=0.3274;%Valor inicial del Coef. Global de transferencia de calor
peri=-37.5391;%Valor inicial de las perdidas del sistema
potqi=3895.4;%Valor inicial de la potencia de refrigeracion

Pvarmli=(100*(ml-mli)/mli)%porcentaje de variacion de la mas de leche
Pvarqi=(100*(abs(q)-abs(qi))/(abs(qi)))%porcentaje de variacion del
calor de refrigeracion
PvarQi=(100*(abs(Q)-abs(Qi))/(abs(Qi)))%porcentaje de variacion de la
potencia de refrigeracion
PvarhLi=(100*(hL-hLi)/hLi)%porcentaje de variacion del coef. de
conveccion de la leche
Pvarhai=(100*(ha-hai)/hai)%porcentaje de variacion del coef. de
conveccion natural del aire
PvarRtotali=(100*(Rtotal-Rtotali)/Rtotali)%porcentaje de variacion de
la resistencia termica total
PvarCOPi=(100*(COP-COPi)/COPi)%porcentaje de variacion del COP
PvarUi=(100*(U-Ui)/Ui)%porcentaje de variacion del Coef. Global de
transf. de calor
PvarPerdidas=(100*(abs(per)-abs(peri))/abs(peri))%porcentaje de
variacion de las perdidas del sistema
PvarPotqi=(100*(abs(potq)-abs(potqi))/abs(potqi))%porcentaje de
variacion de la potencia total de refrigeracion

```

## ANEXO IV

### Código para optimización del sistema de refrigeración.

```
% DINÁMICA Y CONTROL DE REFRIGERADORA SOLAR DE LECHE
clear all;

% COEFICIENTES

V=0.1; % volumen de leche en m3
Tleche=32+273.15; % temperatura de inicial de leche K
Tcamara=4+273.15; % temperatura de cámara K
densidad=1030; % densidad de leche en kg/m3
m=V*densidad % masa de leche kg
ct=0.53; % conductividad térmica en W/m*K
visd=0.0022; % viscosidad dinámica en kg/m*s
Cp=3890; % calor específico de la leche J/(K*kg)
tiempoenfriamiento=3600; % tiempo de enfriamiento en s
deltaT=Tcamara-Tleche % delta temperatura de enfriamiento K
potq=m*Cp*deltaT/tiempoenfriamiento % Potencia frigorífica total W
U=0.3274; % coeficiente global de transferencia de calor
L=0.8; % longitud de la cámara en m
radio=0.405; % radió interno de la cámara en m
As=2*pi*radio*L+4*pi*radio^2 % area superficial interior de la cámara
en m2
Perdidas=-U*As % pérdidas por deltaT unitario en W/oK

% MODELO EN ESPACIO DE ESTADOS
A=[-Perdidas/(m*Cp)];
B=[1/(m*Cp)];
C=[1];
D=[0];
SS=ss(A,B,C,D);
GP=tf(SS);
Gp1=GP(1,1);

% ENFRIAMIENTO INICIAL
% EN LAZO ABIERTO (TERMOSTATO)
step(potq*Gp1,tiempoenfriamiento);
title('Enfriamiento inicial (Lazo Abierto)')
xlabel('Tiempo')
ylabel('Gradiente de Temperatura(°C)')
grid
pause;
% CONTROL EN LAZO CERRADO (MODULACIÓN DE ENFRIAMIENTO)
consigna=-2 % consigna de modulación en oC
[Gc,info]=pidtune(Gp1,'PID')
H=feedback(Gp1*Gc,1)
step(consigna*H)
title('Temperatura de Mantenimiento (Lazo Retroalimentado)')
xlabel('Tiempo')
ylabel('Gradiente de Temperatura(°C)')
grid
% POTENCIA Y ENERGÍA DEL COMPRESOR
COP=2.5;
potWcompresor=-potq/COP %potencia ideal del compresor en W
MJ=potWcompresor*tiempoenfriamiento/1000
kWh=MJ/3.6
```

## ANEXO V

### Código optimizado del sistema de refrigeración.

```
%MODELO OPTIMIZADO

% COEFICIENTES EMPLEADOS

V=0.05; % volumen de leche en m3
Tleche=32+273.15; % temperatura de inicial de leche K
Tcamara=6+273.15; % temperatura de cámara K
densidad=1030; % densidad de leche en kg/m3
m=V*densidad % masa de leche kg
ct=0.53; % conductividad térmica en W/m*K
visd=0.0022; % viscosidad dinámica en kg/m*s
Cp=3890; % calor específico de la leche J/(K*kg)
tiempoenfriamiento=1800; % tiempo de enfriamiento en s
deltaT=Tcamara-Tleche % delta temperatura de enfriamiento K
potq=m*Cp*deltaT/tiempoenfriamiento % Potencia frigorífica total W
U=0.2709; % coeficiente global de transferencia de calor
L=0.8; % longitud de la cámara en m
radio=0.405; % radió interno de la cámara en m
As=2*pi*radio*L+4*pi*radio^2 % area superficial interior de la cámara
en m2
Perdidas=-U*As % pérdidas por deltaT unitario en W/oK

% MODELO EN ESPACIO DE ESTADOS
A=[-Perdidas/(m*Cp)];
B=[1/(m*Cp)];
C=[1];
D=[0];
SS=ss(A,B,C,D);
GP=tf(SS);
Gp1=GP(1,1);

% ENFRIAMIENTO INICIAL
% EN LAZO ABIERTO (TERMOSTATO)
step(potq*Gp1,tiempoenfriamiento);
title('Enfriamiento inicial (Lazo Abierto)')
xlabel('Tiempo')
ylabel('Gradiente de Temperatura(°C)')
grid
pause;
% CONTROL EN LAZO CERRADO (MODULACIÓN DE ENFRIAMIENTO)
consigna=-2 % consigna de modulación en oC
[Gc,info]=pidtune(Gp1,'PID',0.035)
H=feedback(Gp1*Gc,1)
step(consigna*H)
title('Temperatura de Mantenimiento (Lazo Retroalimentado)')
xlabel('Tiempo')
ylabel('Gradiente de Temperatura(°C)')
grid

% POTENCIA Y ENERGÍA DEL COMPRESOR
COP=2.5;
potWcompresor=-potq/COP %potencia ideal del compresor en W
MJ=potWcompresor*tiempoenfriamiento/1000
kWh=MJ/3.6
```