

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TANQUE DE REFRIGERACIÓN DE 800 LITROS DE CAPACIDAD CON SISTEMA AUTOMÁTICO DE REFRIGERACIÓN PARA ALMACENAMIENTO DE LECHE CRUDA EN LA HACIENDA LA ALBORADA UBICADA EN LA PROVINCIA DEL CARCHI.”

Universidad de las fuerzas armadas – ESPE

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica - Ingeniería Mecatrónica

Milton Patricio Rodríguez Álvarez, Diego Wladimir Vera Aguilera

Ing. Xavier Segovia, Ing. Francisco Pazmiño

Sangolquí, Ecuador 2014

I. RESUMEN

El “Diseño y construcción de un tanque de 800 litros de capacidad con sistema automático de refrigeración para almacenamiento de leche cruda en la hacienda la Alborada ubicada en la provincia del Carchi”, basa su desarrollo en la combinación de las diferentes ramas que conforma la Ingeniería Mecatrónica, basándose principalmente en la Ingeniería Mecánica, Eléctrica, Electrónica y Control.

Este proyecto consiste en desarrollar un sistema de refrigeración automático, capaz de enfriar la leche cruda hasta una temperatura de 3 a 4 °C, en un periodo de 3 horas como máximo, para evitar la reproducción de bacterias y mantener la

calidad de la leche, mientras se transfiere el producto a la industria de derivados lácteos.

Para cumplir con la satisfacción de las necesidades planteadas por la hacienda “LA ALBORADA”, se usó las normas INEN (CPE 007:1983) y la norma ASHRAE (Sociedad Americana de aire acondicionado, refrigeración y calefacción), con lo cual se fundamenta el diseño y la construcción del tanque de almacenamiento para leche cruda, además se obtuvo de las mismas, datos específicos importantes para mantener la leche en las mejores condiciones de sanidad.

Palabras Clave – Sistema de refrigeración, leche cruda, tanque de almacenamiento, temperatura, transferencia de calor

II. INTRODUCCIÓN

Debido a su muy específica composición, la leche es susceptible de contaminación por una amplia variedad de bacterias. La leche cruda en la hacienda puede contener pocas bacterias por mililitro si ésta es higiénica, hasta varios millones si los niveles de limpieza, desinfección y enfriamiento son bajos.

La leche sale de la ubre a una temperatura de 37°C y está prácticamente libre de bacterias, pero debe ser protegida contra infecciones tan pronto como se termina el proceso de ordeño. Los microorganismos capaces de contaminar la leche están en todas partes: en las ubres, en las manos del ordeñador, en partículas presentes en el aire, en gotas de agua, en el suelo, etc. La leche contaminada de esta manera debe ser filtrada.

Según la norma INEN respecto al “Código de práctica de Instalación y servicio de tanques refrigerados para leche” manifiesta que la temperatura adecuada de almacenamiento después del proceso del ordeño es de 4°C, mejorando así en gran medida sus cualidades para una mejor conservación y evitando el crecimiento acelerado de bacterias después de un lapso de tiempo.

En la leche considerada de la más alta calidad, el número de bacterias UFC (Unidades Formadoras de Colonias) debe ser inferior a 30.000 por mililitro.

Para la hacienda “LA ALBORADA” que cuenta con una alta producción de leche para la comercialización, sería de gran beneficio un sistema de enfriamiento para mejorar la calidad del producto final, ya que actualmente el procedimiento de entrega de la leche se lo realiza mediante pequeños tanques metálicos, llevando lo más pronto posible al cliente sin tener en cuenta la temperatura, por lo que no se está garantizando la calidad del producto entregado.

III. METODOLOGÍA

El sistema automático de refrigeración de leche comprende, un tanque de almacenamiento aislado térmicamente para evitar la pérdida y ganancia de calor a través de las paredes. Además el equipo de refrigeración debe ser capaz de absorber el calor de la leche almacenada y disipar el mismo hacia el ambiente.

Cuenta con un control de encendido automático cuando la temperatura esté por encima del rango establecido, y a su vez se apagará automáticamente cuando la temperatura de la leche se encuentre entre los 3 y 4 grados centígrados, durante el

proceso de enfriamiento la leche será homogenizada por medio de un sistema de agitación continua.

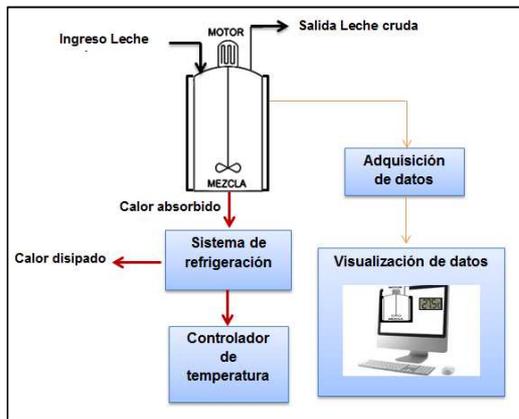


Ilustración 1. Sistema de refrigeración.
Elaborado por: Rodríguez, Milton y Vera, Diego.

Las variables como: tiempo de enfriamiento, volumen y temperatura de la leche podrán ser visualizadas en un ordenador mediante una interfaz gráfica realizada en un software.

3.1. Sistema Mecánico

Los sub-sistemas que conforman el sistema mecánico de este proyecto son los siguientes:

Sub-sistema tanque de refrigeración

Los tanques de almacenamiento de leche también son diseñados dependiendo del número de ordeños que la empresa realiza diariamente.

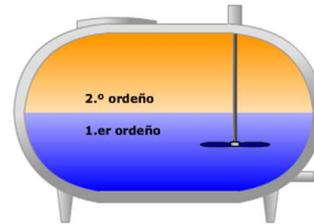


Ilustración 2. Tanque para dos ordeños.
(Danfoss. Módulo 1, 2014).

La manufactura de las tapas internas es de gran importancia para facilitar su lavado y desinfección, por lo que no debe presentar poros o grietas donde puedan formarse bacterias. A su vez no debe contar con acabados perpendiculares en su construcción.

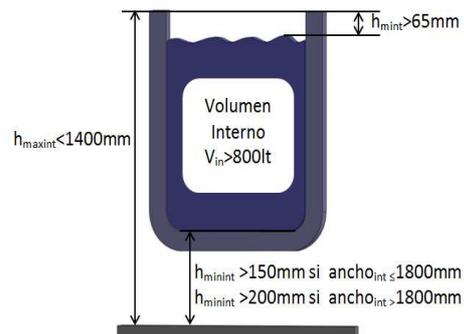


Ilustración 3. Condiciones de diseño tanque.
Elaborado por: Rodríguez, Milton y Vera, Diego.

Obteniendo como resultado: un ancho interno de 60mm, altura de 1140mm y una profundidad de 1100mm. El material con que fue construido es acero inoxidable AISI 304, pues es vital para uso de alimentos.

La resistencia térmica del aislante debe ser lo suficientemente alta para no perder calor, por lo tanto según Danfoss para este tipo

de aplicaciones recomienda un espesor de 60mm.

Sub-sistema de agitación

Consta de dos elementos fundamentales para el movimiento del fluido dentro del tanque de refrigeración.

Rodete: Para tanques de capacidad media-baja, y velocidades entre 15 a 150 rpm, el rodete más adecuado es el de palas verticales debido a que genera movimientos de tipo radial y tangencial. Además se añadieron destajes ubicados en sentido contrario en cada uno de los extremos del rodete para una mejor mezcla.

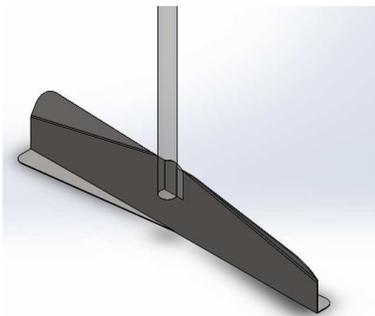


Ilustración 4. Rodete de palas verticales.
Elaborado por: Rodríguez, Milton y Vera, Diego.

Motorreductor: Se considera un aspecto muy importante el cálculo de la potencia del motor que se requiere para mover el sub-sistema de agitación (eje y rodete) y la fuerza que se necesita para agitar el fluido a velocidades comprendidas entre 20 a 30 rpm, recomendadas para tanques de refrigeración de leche. Una vez conocidas

las principales características, elegimos el reductor más adecuado, considerando la velocidad de salida (20rpm), el factor de servicio (0,9) y el torque máximo de salida (2045,5 lbf*in).

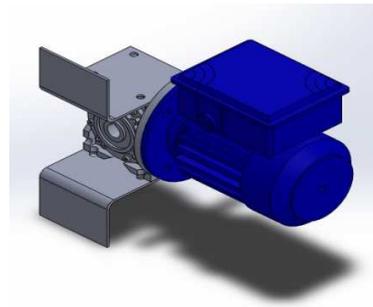


Ilustración 5. Motorreductor y sus bases.
Elaborado por: Rodríguez, Milton y Vera, Diego.

Sub-sistema unidad condensadora

Es parte del ciclo de refrigeración por compresión de vapor y es fundamental una adecuada selección de la unidad condensadora a partir de la potencia calorífica que se desea rechazar por parte de la leche cruda.

$$\dot{Q}_{rechazado} = \frac{\rho_{leche} * V_{leche} * C_{p_{leche}} * \Delta T}{t}$$

$$\dot{Q}_{rechazado} = \frac{1030 \frac{kg}{m^3} * 0,4 m^3 * 3930 \frac{J}{kg * ^\circ C} * 31 ^\circ C}{10800 s}$$

$$\dot{Q}_{rechazado} = 4,648 kW$$

La producción de la hacienda “La Alborada”, realiza dos ordeños diarios y por tanto en el primer ordeño solo se almacena 400 litros de leche, producto que deberá ser

refrigerado en el tiempo determinado por las normas(3 horas aproximadamente). Agregando las pérdidas que se producen en el interior del tanque de refrigeración, la carga térmica total sería la siguiente:

$$\dot{Q}_{Total} = 4,673 \text{ kW}$$

La selección de la unidad condensadora se tiene de la carga térmica calcula, la temperatura de evaporación (-5°C) del refrigerante R22 y la temperatura de condensación (33°C).

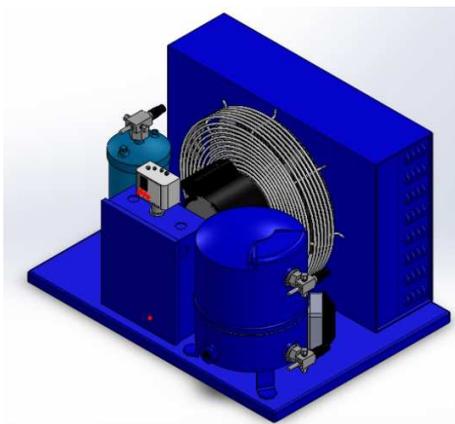


Ilustración 6. Unidad condensadora Danfoss.
Elaborado por: Rodríguez, Milton y Vera, Diego.

Sub-sistema evaporador

Está constituido por un serpentín fabricado en tubería de cobre, que permite al refrigerante circular a una velocidad suficiente para asegurar el retorno del aceite al compresor.

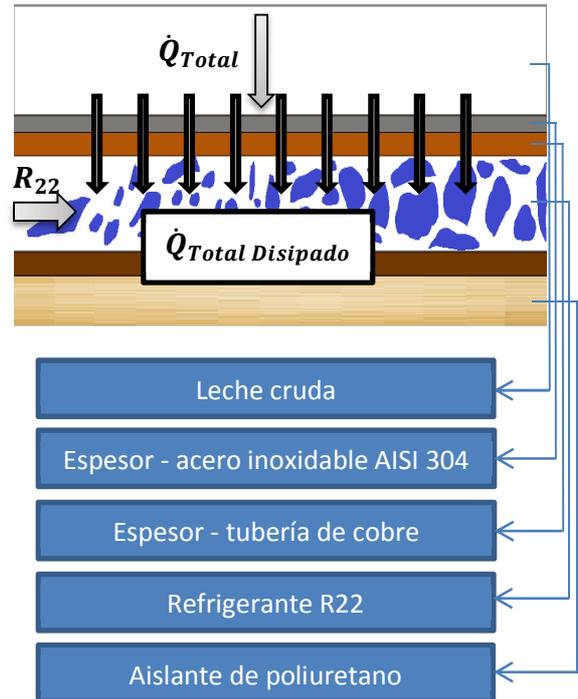


Ilustración 7. Transferencia de calor R22.
Elaborado por: Rodríguez, Milton y Vera, Diego.

El elemento permite el cambio de fase de líquido a gas, pero para ello absorbe calor de un depósito, en este caso del tanque de almacenamiento de leche cruda. Mediante la transferencia de calor que se produce entre la tapa inferior del tanque y el serpentín se obtiene una longitud del serpentín de 40m.

Ciclo termodinámico

La etapa termodinámica está constituida por 4 etapas fundamentales y sus elementos complementarios.

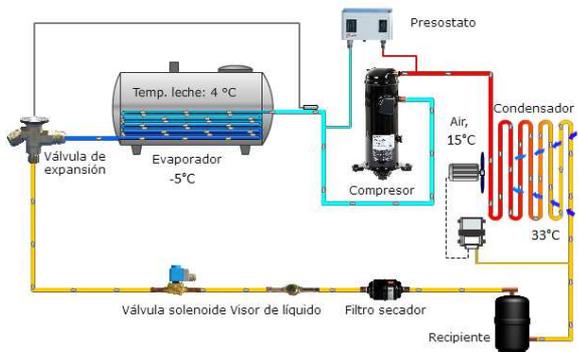


Ilustración 8. Ciclo termodinámico.
(Danfoss. Módulo 1, 2014).

El diseño se basa principalmente en el ciclo de refrigeración por compresión de vapor, comprendiendo la etapa de compresión, condensación, expansión y evaporación. Sus complementos están dados por los accesorios que se indican en la línea de líquido como son: acumulador, filtro, visor y válvula solenoide.

Idealmente las condiciones de diseño se basan en la carga térmica y el diferencial de energía (Δh) que realiza el evaporador para rechazar el calor almacenado en el tanque.

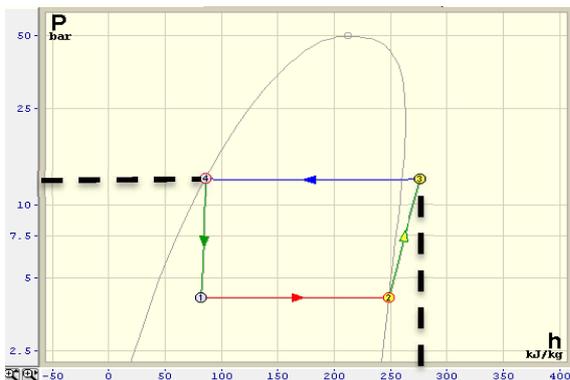


Ilustración 9. Curva característica R22.
Elaborado por: Rodríguez, Milton y Vera, Diego.

3.2. Sistema eléctrico-electrónico

El sistema como tal tiene sensores, una tarjeta electrónica y un tablero de potencia, sin lugar a duda estos componentes hacen del equipo automatizado, reduciendo el trabajo manual para ofrecer una producción más eficiente y reduciendo el riesgo del operador.

Sensor de temperatura tipo J

Los termopares tipo J son versátiles, de bajo coste y debido al rango de aplicación y a la facilidad para la compensación de unión fría, nos permite hacer uso del mismo para la visualización de sus valores a través de la interfaz gráfica.

Para solucionar los problemas de compensación de unión fría y la no linealidad que presenta el termopar, se usó el circuito integrado AD594. Este integrado proporciona una temperatura de salida de 10 mV/°C debido a amplificadores internos que producen variaciones de ganancia en función del coeficiente de Seebeck.



Ilustración 10. Sensor de temperatura tipo J.
Elaborado por: Rodríguez, Milton y Vera, Diego.

Sensor ultrasónico MAXSONAR-EZ2

El sensor cuenta con una alimentación de cinco voltios, salida análoga, salida por ancho de pulso y un protocolo serial.

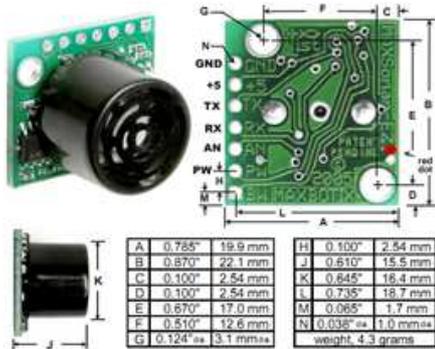


Ilustración 101. Sensor ultrasónico.
(Catálogo MAXSONAR-EZ2, 2014).

La sensibilidad del sensor es de 9,8mV/in, con este valor se analiza el volumen del tanque a partir de la distancia medida por el área transversal, restando del volumen total de la parte interna del tanque se registrará el valor de la cantidad de leche que se encuentra en ese momento.

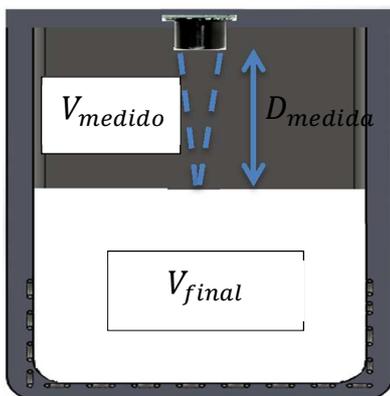


Ilustración 12. Representación volumétrica.
Elaborado por: Rodríguez, Milton y Vera Diego.

Circuitos electrónicos

La tarjeta electrónica fue diseñada específicamente para conectar las entradas de los sensores hacia el microcontrolador, el cual, a través del compilador mikroBasic el PIC16f877A fue programado, para realizar la acción de recibir el dato por medio de la librería ADC_Read() y enviar el dato adquirido por medio de la librería UART_Write(), respectivamente para cada variable.

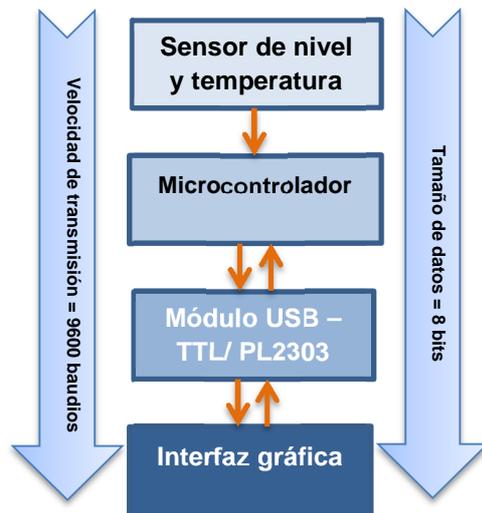


Ilustración 113. Diagrama de comunicación.
Elaborado por: Rodríguez, Milton y Vera, Diego.

Alimentación eléctrica

El tablero de potencia va estar conectada a la red eléctrica de 220 VAC monofásica, debido a que la unidad condensadora, Motorreductor, indicadores, controlador y la fuente de voltaje DC se alimentan con dicho voltaje.

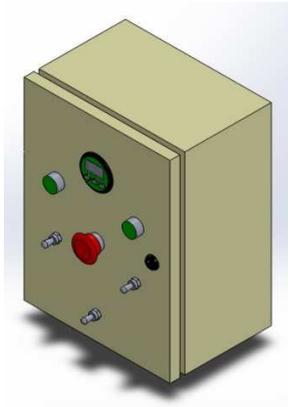


Ilustración 124. Tablero de control y potencia.
Elaborado por: Rodríguez, Milton y Vera, Diego.

3.3. Sistema de control

El controlador de temperatura de la marca Full Gauge, de serie MT-516CVT puede ser usado tanto para calefacción como refrigeración. Entre sus funciones principales están:

- Temperatura de referencia configurable de acuerdo a las necesidades.
- Posee un temporizador cíclico para el sistema de agitación luego de haber transcurrido el periodo de refrigeración estimado.
- Monitor de tensión de la red eléctrica de alta precisión.
- Tiempo de retardo a la desconexión variable luego de haber terminado el proceso de refrigeración.

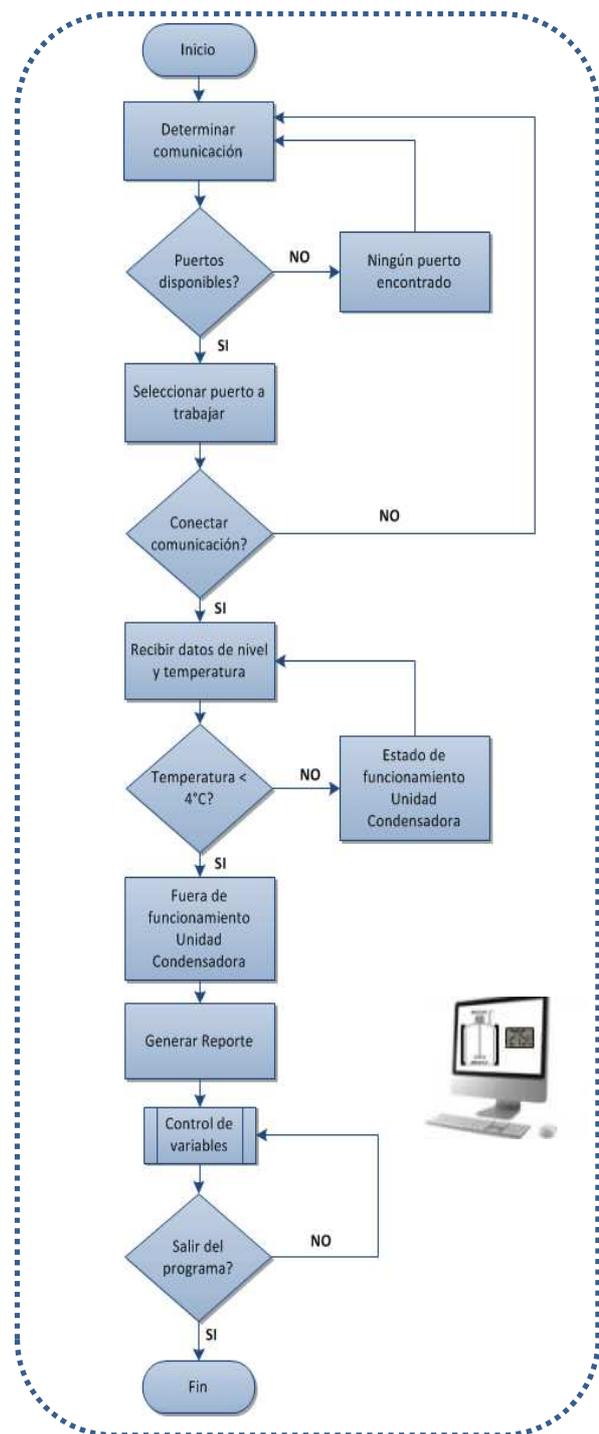


Ilustración 135. Algoritmo de control - variables.
Elaborado por: Rodríguez, Milton y Vera, Diego.

IV. Resultados

Según los resultados arrojados en la toma de datos, el tiempo de refrigeración de la leche es de 3 horas 15 minutos en los dos ordeños. Para el segundo ordeño la variación de temperatura en función del tiempo es poca debido a que se requiere refrigerar el doble de volumen, pero toma el mismo tiempo que en el primer ordeño ya que la temperatura inicial a refrigerar es menor. Como se muestran en las siguientes gráficas.

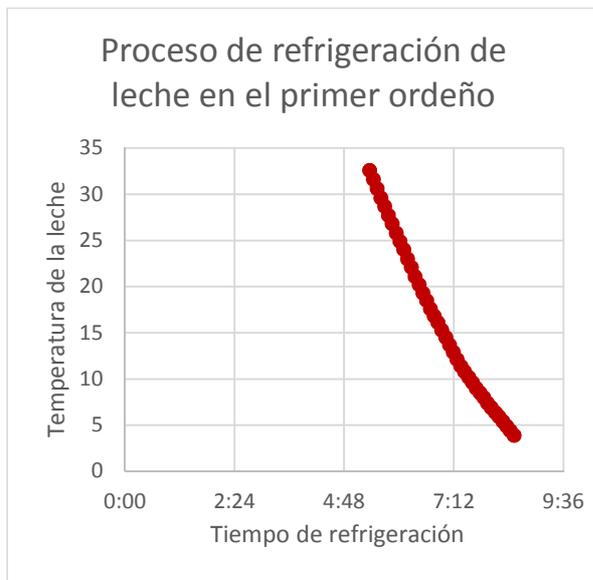


Ilustración 16. Temperatura vs Tiempo de refrigeración en el primer ordeño.
Elaborado por: Rodríguez, Milton y Vera, Diego.

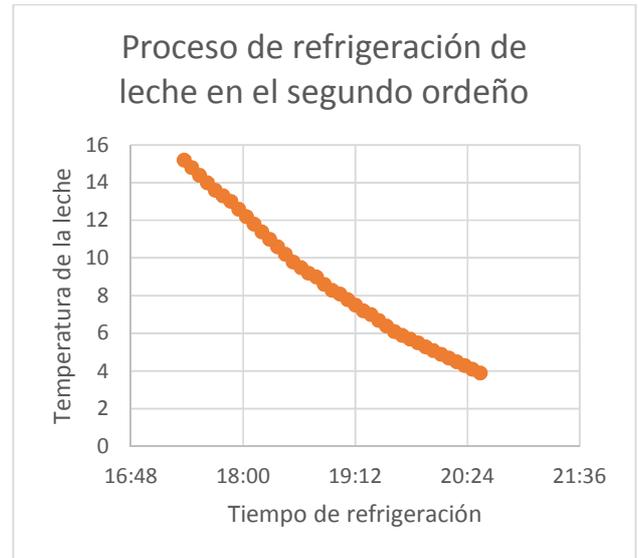


Ilustración 147. Temperatura vs Tiempo de refrigeración en el segundo ordeño.
Elaborado por: Rodríguez, Milton y Vera, Diego.

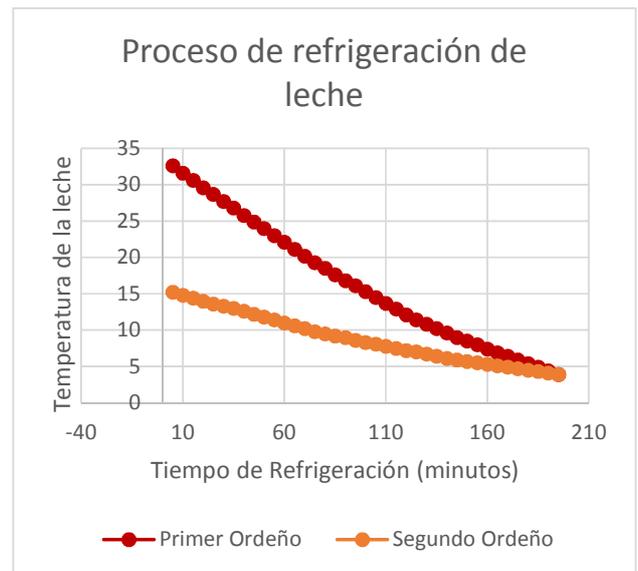


Ilustración 158. Temperatura vs Tiempo de refrigeración de los dos ordeños.
Elaborado por: Rodríguez, Milton y Vera, Diego.

V. Discusión

El protocolo de pruebas también es fundamental en el análisis de resultados,

logrando convalidar el funcionamiento del sistema de refrigeración.

Para verificar las diferentes pruebas mencionadas en el protocolo se utilizaron elementos de medición por parte del supervisor, como es una regla graduada específica para medición del volumen y un pirómetro para tomar los datos de temperatura en situ.

El análisis de la calidad del producto se relaciona directamente con la reproducción de bacterias, siendo el ente más importante a controlar, para lo cual después de culminar con las pruebas del sistema de refrigeración se realizó un análisis de la leche por medio de la empresa “LA FLORALP”, obteniendo un valor de 20000 UFC.

Según datos obtenidos por parte de la empresa “LA FLORALP” la leche es cotizada de acuerdo al desarrollo bacteriológico, consiguiendo por parte de la hacienda “LA ALBORADA” un producto de calidad y logrando un ingreso económico aceptable para su progreso en la industria láctea.

VI. Conclusiones

- Mediante diferentes técnicas y herramientas referentes al diseño de ingeniería, se seleccionaron e implementaron los sistemas mecánicos,

eléctrico/electrónicos y de control el cual son parte fundamental en un equipo mecatrónico.

- La flexibilidad del sistema asegura el control de temperatura en todo momento debido a que presenta dos tipos de controladores, donde el principal es un equipo robusto y específico para este tipo de aplicaciones, el cual brinda fiabilidad en la temperatura mostrada y a su vez asegura protección contra sobrevoltajes que se presentan a menudo en las zonas rurales, mientras que el segundo garantiza el control en caso de daños del equipo principal, donde gracias a sus características facilitan al operador el reemplazo del equipo, cumpliendo el control de temperatura dentro de los rangos establecidos por la norma INEN CPE 007.
- Se realizó un protocolo de pruebas para contemplar el pleno funcionamiento del equipo, cumpliendo los rangos permisibles de temperatura, capacidad y análisis microbiológico, señalando que este último fue revisada por la hacienda “LA ALBORADA” a través de su cliente “LA FLORALP” obteniendo resultados de UFC menores a 30000, siendo un dato aceptable por parte de la industria láctea.

- Luego de haber realizado las pruebas correspondientes del sistema de refrigeración, se obtuvo la leche refrigerada dentro de los rangos de temperatura permisibles (3 a 4°C) después de un tiempo de 3 horas 15 minutos, esto implica que en la práctica la etapa de evaporización no trabajó eficientemente debido al del montaje del serpentín, el cual no se mantuvo en contacto directo con la plancha interna de acero inoxidable AISI 304.

VII. Referencias

- ASHRAE. (2009). *Fundamentos Ciclos de refrigeración y Termodinámica*.
- ASHRAE. (2009). *Fundamentos Flujo bifásico*.
- Cao, E. (2004). *Transferencia de calor e ingeniería de procesos*. Argentina.
- Danfoss. (2013). Manual de operación y mantenimiento de la unidad condensadora.
- Danfoss. (2014). *Aplicación, tanques de refrigeración de leche, módulo 1*.
Obtenido de
<https://danfoss.sabahosted.com/SabaWeb/Main>
- Edward, L., Víctor, A., & Suzanne, M. (2004). *Handbook of Industrial Mixing*. New Jersey.
- EMERSON Climate Technologies. (2013). *Manual técnico de Refrigeracion y Aire Acondicionado*.
- Grupo Quimipac. (2013). Cálculo del espesor de poliuretano. Ecuador.
- Gösta Bylund, M. (1996). *Manual de Industrias lácteas*. (A. López Gómez, Trad.) Madrid, España: Tetra Pack.
- Holman , J. (1998). *Transferencia de calor* . España: Mc GrawHill.
- Norma ARI 710-86. (s.f.).
- NORMA CPE INEN 007. (1983). Instalación y servicio de tanques refrigerados para leche. Ecuador.
- Incropera , F., & De Witt, D. (1999). Fundamentos de transferencia de calor. México: PEARSON.
- TermoGraf V5.7. (1997-2014). Grupo de didáctica en Ingeniería Térmica.
- Yunus Cengel , A., & Boles, M. (2009). *Termodinámica*. México: Mc GrawHill.
- Yunus Cengel, A. (2004). *Transferencia de calor*. Mc Graw-Hill.