

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DISPENSADOR AUTOMÁTICO DE  
PRODUCTOS LÁCTEOS REFRIGERADOS**

**DARIO MÉNDEZ MÉNDEZ  
GUSTAVO ADOLFO TOLOZA TABARES**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2016**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DISPENSADOR AUTOMÁTICO DE  
PRODUCTOS LÁCTEOS REFRIGERADOS**

**DARIO MÉNDEZ MÉNDEZ  
GUSTAVO ADOLFO TOLOZA TABARES**

**Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico**

**Director  
JULIAN ERNESTO JARAMILLO IBARRA  
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2016**

## DEDICATORIAS

*A Dios por darme la fuerza y salud para seguir adelante y superar todas las adversidades.*

*A mis padres Mariela Méndez Fonseca y Félix Méndez Álvarez, quienes por su gran amor, apoyo incondicional y esfuerzo, me permitieron cumplir con las metas planteadas, en la formación personal y profesional.*

*A mi hermano Nelson Javier Rojas Méndez, por apoyarme y estar siempre presente en los momentos difíciles.*

*A mi amigo y compañero de tesis Gustavo Toloza Tabares, con quién hicimos que este sueño se cumpliera.*

*A mi familia y amigos quienes me motivaron para alcanzar este objetivo.*

**Dario Méndez Méndez**

*A mi familia en especial a mi mamá Ana María Tabares Meza, por su esfuerzo y apoyo incondicional para el logro de una meta más.*

*A mi novia Katherin Garces, por su compañía y apoyo en los momentos de mayor dificultad durante el transcurso de esta etapa en mi vida.*

*A mi amigo y compañero de tesis Dario Méndez Méndez, con quién hicimos que este sueño se cumpliera.*

*A mis amigos que me han acompañado en la vida, Nicolás y Aldry.*

**Gustavo Toloza Tabares**

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Industrial de Santander por la formación académica y humana que nos brindó.

Al profesor Ph.D. Julián Jaramillo Ibarra, por su confianza, dedicación y recomendaciones realizadas en la elaboración y ejecución de este proyecto.

A la familia Mancilla Camaño, en especial a la señora Isabel María Camaño, quienes con su ayuda y hospitalidad, colaboraron en el desarrollo de este proyecto.

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	23
1. OBJETIVOS .....	25
1.1. OBJETIVO GENERAL .....	25
1.1.1 Objetivos Específicos .....	25
2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL DISPENSADOR AUTOMÁTICO DE PRODUCTOS LÁCTEOS REFRIGERADOS .....	27
2.1 LECHE CRUDA .....	28
2.2 LA PASTEURIZACION .....	29
2.3 PROPIEDADES FISICAS DE LA LECHE .....	30
2.4 ENFRIAMIENTO DE LA LECHE PASTEURIZADA .....	30
2.5 MÁQUINAS EXPENDEDORAS .....	31
2.6 TRANSFERENCIA DE CALOR.....	33
2.6.1 Transferencia de calor por conducción .....	33
2.6.2 Transferencia de calor por convección.....	35
2.7 REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR.....	37
2.8 FLUIDOS REFRIGERANTES .....	38
2.9 SISTEMA DE AGITACIÓN.....	39

2.9.1	Tanques agitados.....	39
2.9.2	Rodetes.....	40
2.9.3	Tipos de rodete .....	40
3.	REQUERIMIENTOS GENERALES DE DISEÑO .....	42
3.1.	ORGANIZACIÓN DE REQUERIMIENTOS .....	42
3.2.	SISTEMA DE REFRIGERACIÓN.....	43
2.3	TANQUES DE ALMACENAMIENTO .....	44
3.	DISEÑO DE LOS TANQUES DE ALMACENAMIENTO Y SISTEMA DE AGITACIÓN .....	47
3.1	DISEÑO GEOMÉTRICO DE LOS TANQUES.....	47
3.2	ANÁLISIS ESTÁTICO DE LOS TANQUES .....	48
3.3	DISEÑO DEL SISTEMA DE AGITACIÓN .....	51
3.3.1	Dimensionamiento y ubicación del agitador .....	51
3.3.2	Aspectos importantes para seleccionar el motor-agitador.....	53
3.3.3	Potencia mecánica del moto-reductor .....	53
3.3.4	Selección del motorreductor.....	56
3.3.5	Determinación del diámetro del eje del agitador. ....	56
3.3.6	Determinación del espesor de las paletas del agitador.....	58
4	DISEÑO TÉRMICO .....	59

4.1	CARGA TÉRMICA DE LA LECHE .....	59
4.1.1	Temperatura de ingreso de la leche.....	59
4.1.2	Temperatura de conservación.....	59
4.1.3	Temperatura del ambiente exterior .....	60
4.2	TRANSFERENCIA DE CALOR A TRAVÉS DE LAS SUPERFICIES DEL TANQUE .....	61
4.3	GANANCIA DE CALOR DESDE EL AMBIENTE A TRAVES DE LA SUPERFICIE CILINDRICA DEL TANQUE.....	64
4.4	GANANCIA DE CALOR DESDE EL AMBIENTE A TRAVÉS DE LA TAPA SUPERIOR DEL TANQUE.....	72
4.5	GANANCIA DE CALOR DESDE EL AMBIENTE A TRAVES DE LA TAPA INFERIOR DEL TANQUE .....	78
4.6	CALOR POR SERVICIO .....	83
4.7	ENERGIA ALMACENADA EN LOS TANQUES Y EL MATERIAL AISLANTE .....	84
4.8	GANANCIA DE CALOR TOTAL TANQUE DE LECHE .....	85
4.9	RESUMEN CALCULOS TÉRMICOS TANQUE DE YOGURT .....	85
4.10	CARGA TÉRMICA TOTAL.....	86
4.11	SISTEMA DE REFRIGERACIÓN.....	86
4.11.1	Selección del refrigerante.....	86
4.11.2	Temperatura de evaporación y condensación del refrigerante .....	87

4.11.3	Compresor .....	87
4.11.4	Condensador.....	89
4.11.5	Tubo capilar .....	90
4.11.6	Evaporador.....	91
4.11.7	Coeficiente de transferencia de calor bifásico del refrigerante R134a .....	93
4.11.8	Cálculo de la longitud del evaporador .....	105
5	DISEÑO DE LA ESTRUCTURA.....	109
5.1	ANÁLISIS ESTRUCTURAL.....	109
6	SISTEMA DE CONTROL ELECTRÓNICO .....	113
6.1	FUNCION Y COMPONENTES DEL SISTEMA DE CONTROL .....	113
6.1.1	Microcontrolador ATMEGA 32U4.....	113
6.1.2	Fuente de 12 voltios.....	115
6.1.3	Pantalla LCD.....	115
6.1.4	Teclado .....	116
6.1.5	Relé electromecánico 12 voltios.....	116
6.1.6	Botones electrónicos.....	117
6.2	SISTEMA DE PAGO ELECTRÓNICO .....	117
6.2.1	Billetero electrónico BV20 .....	117
6.2.2	Monedero electrónico multimoneda YD-M715 .....	118

6.3	PLANO ELÉCTRICO DE CONEXIONES.....	119
6.4	DISEÑO DE PLACA DE CIRCUITO IMPRESO PCB.....	119
6.5	PROGRAMA EN PLATAFORMA DE MICROC PRO.....	120
6.6	ALGORITMO DEL SISTEMA DE CONTROL.....	122
7	SISTEMA DE BOMBEO.....	123
7.1	BOMBA 12 V.....	123
7.2	VÁLVULA DE SALIDA .....	124
7.3	MANGUERA PARA ALIMENTOS.....	125
7.4	CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO.....	125
8	PRUEBAS DE DESEMPEÑO Y FUNCIONAMIENTO .....	129
8.1	PRUEBAS DE ENFRIAMIENTO .....	129
8.2	ANALISIS DE RESULTADOS PRUEBA DE ENFRIAMIENTO .....	134
8.3	PRUEBAS FUNCIONAMIENTO SISTEMA DE CONTROL Y DISPENSADOR.....	135
9.	PRESUPUESTO .....	147
10.	CONCLUSIONES.....	148
11.	RECOMENDACIONES.....	151
	REFERENCIAS .....	152

## LISTADO DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Descripción general del dispensador automático de productos lácteos refrigerados.....	27
Figura 2. Dispensador automático de productos lácteos refrigerados. ....	28
Figura 3. Distintos tipos de objetos de uso público soportes para servicios automatizados.....	32
Figura 4. Sistema de refrigeración por compresión de vapor. ....	37
Figura 5. Formas de agitación: axial (A) y radial (B). ....	40
Figura 6. Tipos de rodete.....	41
Figura 7. Resultados en ANSYS de los esfuerzos, deformaciones y factor de seguridad tanque almacenamiento de leche. ....	49
Figura 8. Resultados en ANSYS de los esfuerzos, deformaciones y factor de seguridad tanque almacenamiento de yogurt. ....	50
Figura 9. Diseño agitador.....	52
Figura 10. Numero de potencia vs Numero de Reynolds. ....	55
Figura 11. Motorreductor 25 RPM.....	56
Figura 12. Radios geométricos del cilindro. ....	62
Figura 13. Resistencias térmicas paredes del tanque. ....	62
Figura 14. Resistencias térmicas análisis temperatura de película.....	64
Figura 15. Resistencias térmicas tapa superior. ....	72

Figura 16. Resistencias térmicas tapa inferior. ....	78
Figura 17. Datos técnico R134a.....	87
Figura 18. Compresor Embraco, ref 1/3 HP.....	88
Figura 19. Selección compresor Embraco. ....	88
Figura 20. Programa selección tubo capilar.....	91
Figura 21. Disposición de los tubos del evaporador en los tanques de almacenamiento.....	92
Figura 22. Tubo del evaporador aislado. ....	92
Figura 23. Tubo de cobre modelado como una aleta recta de punta aislada. ....	93
Figura 24. Regímenes diferentes de flujo que se encuentran en la ebullición en un tubo con convección forzada. ....	94
Figura 25. Rango de temperaturas de vaporación del R134a. ....	96
Figura 26. Valores <i>F<sub>fl</sub></i> fluido específico. ....	103
Figura 27. Proceso de transferencia de calor desde el interior del tanque hasta el refrigerante R134a.....	105
Figura 28. Resistencias térmicas del evaporador. ....	105
Figura 29. Aleta rectangular recta.....	106
Figura 30. Base estructural del sistema completo. ....	109
Figura 31. Análisis de esfuerzos en la estructura base.....	111
Figura 32. Factor de seguridad de la estructura base.....	112

Figura 33. Análisis de deformación de la estructura base. ....	112
Figura 34. Microcontrolador Atmega 32U4. ....	114
Figura 35. Configuración de pines ATmega32U4. ....	114
Figura 36. Fuente 12 voltios.....	115
Figura 37. Pantalla LCD 16x1.....	115
Figura 38. Teclado .....	116
Figura 39. Relé electromecánico 12 voltios .....	116
Figura 40. Botón electrónico. ....	117
Figura 41. Billetero electrónico BV20.....	118
Figura 42. Monedero electrónico YD-M715. ....	119
Figura 43. Diseño circuito impreso PCB. ....	120
Figura 44. Algoritmo sistema de control.....	122
Figura 45. Bomba 12V TL-B10. ....	123
Figura 46. Válvula en acero inoxidable. ....	124
Figura 47. Manguera para alimentos. ....	125
Figura 48. Tanques de almacenamiento.....	129
Figura 49. Unidad condensadora.....	129
Figura 50. Termómetro digital GENERAL DT4947SD. ....	130
Figura 51. Distribución sensor prueba 1 tanque de yogurt. ....	131

Figura 52. Distribución sensor prueba 1 tanque de leche.....	131
Figura 53. Temperatura del agua fase de enfriamiento prueba 1.....	132
Figura 54. Distribución de sensores prueba 2, tanque de yogurt.....	133
Figura 55. Fase de enfriamiento en tres puntos distintos del tanque de 20 Lts. ...	133
Figura 56. Distribución de sensores prueba 3, tanque de leche.....	134
Figura 57. Fase de enfriamiento en tres puntos distinto del tanque de 60 Lts.....	134
Figura 58. Placa electrónica.....	136
Figura 59. Dispositivos de interfaz con el usuario.....	136
Figura 60. Sistema de bombeo.....	137
Figura 61. Cubículo para dispensar el producto.....	137
Figura 62. Selección producto prueba 1 sistema de control.....	138
Figura 63. Selección cantidad 0.5 litro.....	138
Figura 64. Aceptación del producto.....	139
Figura 65. Ubicación del recipiente en el cubículo dispensador.....	139
Figura 66. Pago con billetes de \$1000.....	140
Figura 67. Líquido dispensado prueba 1 sistema de control.....	140
Figura 68. Selección producto prueba 2 sistema de control.....	141
Figura 69. Pago con billetes de \$2000.....	141
Figura 70. Pago con moneda de \$500.....	142

Figura 71. Pago con moneda de \$200.....	142
Figura 72. Pago con moneda de \$100.....	143
Figura 73. Liquido dispensado prueba 2, sistema de control.....	143
Figura 74. Balanza gramera. ....	144

## LISTADO DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Propiedades físicas de la leche. ....	30
Tabla 2. Efecto de la temperatura de almacenamiento en la vida útil de leche pasteurizada. ....	31
Tabla 3. Requerimientos del usuario y recomendaciones para el diseño ingenieril. ....	42
Tabla 4. Ganancia de calor desde el ambiente en función del espesor del aislante. ....	68
Tabla 5. Resumen cálculos térmicos tanque de leche y yogurt. ....	85
Tabla 6. Especificaciones técnicas compresor Embraco ref 1/3 HP. ....	89
Tabla 7. Especificaciones técnicas condensador Embraco. ....	89
Tabla 8. Propiedades del refrigerante R134a a -10°C. ....	97
Tabla 9. Coeficiente bifásico en función de la calidad del refrigerante. ....	104
Tabla 10. Sumatoria de pesos de los componentes sobre el soporte base. ....	110
Tabla 11. Especificaciones técnicas Bomba 12V. ....	124
Tabla 12. Caracterización bomba y tanque de leche. ....	127
Tabla 13. Caracterización bomba y tanque de yogurt. ....	127
Tabla 14. Tiempos para dispensar las cantidades ofrecidas del tanque de leche. ....	128

Tabla 15. Tiempos para dispensar las cantidades ofrecidas del tanque de yogurt.  
.....128

Tabla 16. Resultados prueba sistema de control y bombeo, tanque 20 litros.....144

Tabla 17. Resultados prueba sistema de control y bombeo, tanque de 60 litros. 145

Tabla 18. Costos de construcción.....147

## RESUMEN

**TÍTULO:** DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DISPENSADOR AUTOMÁTICO DE PRODUCTOS LÁCTEOS REFRIGERADOS\*

**AUTORES:** MÉNDEZ MÉNDEZ DARIO  
TOLOZA TABARES GUSTAVO ADOLFO\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Dispensador, leche, tanques, refrigeración, control, automatización.

### DESCRIPCIÓN:

La comercialización de los productos lácteos llevada a cabo por los pequeños productores de leche a través del sistema tradicional de cantinas, ha generado un servicio con bajos índices de calidad y salubridad, ya que mantienen los productos a temperaturas inadecuadas y en ambientes que propician el crecimiento de microorganismos.

Mediante el diseño y construcción de un dispensador automático de productos lácteos refrigerados, accesible para los pequeños productores de leche, se contribuye a mejorar el sistema de venta y conservación de los productos lácteos fabricados.

El dispensador cuenta con dos tanques de almacenamiento de 20 y 60 litros de capacidad, diseñados y fabricados según la norma técnica colombiana NTC 3559 y el código de práctica ecuatoriano INEN 007. Un sistema de bombeo para dispensar los productos a través de componentes especiales para alimentos. El sistema de refrigeración permite conservar la temperatura de los productos en el interior de los tanques en un rango de temperaturas entre 4-6 °C, eliminando los riesgos de proliferación bacteriana, la cual ocurre en los lácteos cuando se conserva a temperaturas superiores a los 6°C. El sistema de control emplea dispositivos de pago electrónicos y componentes de interfaz con el usuario, que permiten una fácil compra y una mayor disponibilidad del producto hacia los clientes, aumentando la rentabilidad para el propietario.

---

\* Proyecto de grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Ing. Julián Ernesto Jaramillo Ibarra.

## ABSTRACT

**TITLE:** DESIGN AND CONSTRUCTION OF AN AUTOMATIC DISPENSER OF COOLED DAIRY PRODUCTS\*

**AUTHORS:** MÉNDEZ MÉNDEZ DARIO  
TOLOZA TABARES GUSTAVO ADOLFO\*\*

**KEYWORDS:** Dispenser, milk, tanks, refrigeration, control, automation.

### DESCRIPTION:

The marketing of dairy products conducted by small milk producers through the traditional system of canteens, has created a low quality and poor salubrity service, since they maintain the products at inadequate temperatures and in environments that promote the growth of microorganisms.

Through the design and construction of an automatic dispenser of cooled dairy products, accessible to small milk producers, it helps to improve the sales system and preservation of manufactured dairy products.

The dispenser has two storage tanks with a capacity of 20 and 60 liters, designed and manufactured according to the Colombian Technical Standard NTC 3559 and the Ecuadorian code of practice INEN 007. A pump system to dispense the product through special food components. The cooling system allows to keep the temperature of the products inside the tanks at a temperature range from 4 to 6 °C, eliminating the risks of bacterial proliferation, which occurs in the milk when stored at temperatures above the 6 °C. The control system uses electronic payment devices and components of the user interface, allowing an easy sale and higher availability of the product to customers, increasing profitability for the owner.

---

\* Degree Project.

\*\* Faculty of Physical Mechanical engineering. School of Mechanical Engineering. Director: Ing. Julián Ernesto Jaramillo Ibarra.

## INTRODUCCIÓN

Los pequeños productores de productos lácteos, realizan la comercialización de estos de una forma totalmente improductiva, donde la venta de estos productos es a domicilio, disminuyendo la disponibilidad de los productos ofrecidos hacia los clientes durante tiempos prolongados. Otro aspecto que interviene en la rentabilidad del negocio, es la necesidad de incluir intermediarios por parte de los productores durante la venta, generando gastos mayores.

La inadecuada refrigeración de los productos lácteos ofrecidos mediante el sistema tradicional de cantinas, ha generado un servicio con bajos índices de calidad y salubridad, atentando en gran medida contra la salud de los consumidores, ya que mantienen los productos a temperaturas inadecuadas y en ambientes que propician el crecimiento de microorganismos que llegan a afectar su salud. Un sistema de refrigeración, el cual mantenga en un nivel de temperatura apropiado el producto, es necesario ya que la proliferación de bacterias en los lácteos se produce al llegar a temperaturas superiores a los 6 [°C], por tanto la conservación en un rango de temperaturas entre 4-6 [°C] es lo más indicado.

En la actualidad se ha visto como los productores de otros artículos han adoptado modernos sistemas automáticos de comercialización, buscando una mejora en la interacción entre el consumidor y los servicios de venta. Como se ha venido mencionando, uno de los objetivos de los pequeños productores de leche es eliminar intermediarios entre la producción y la venta, ya que se incurre en gastos innecesarios en cuanto al transporte de los productos y el trabajo humano necesario para efectuar la movilidad y ejecutar la venta de tales productos. Por tanto, una alternativa efectiva consiste en automatizar el servicio de suministro de los productos lácteos, basados en los sistemas de monederos y billetteros electrónicos de fácil acceso por parte de los clientes. Además, con adecuadas condiciones de temperatura de almacenamiento, con lo cual se puede garantizar

una disponibilidad mayor y un producto en óptimas condiciones para el consumo humano.

Mediante el diseño y la construcción del dispensador automático de productos lácteos refrigerados, se pretende mejorar el sistema de venta y almacenamiento de dichos productos.

El dispensador automático ofrece un sistema de almacenamiento de productos lácteos en un rango de temperatura óptimo, eliminando los riesgos de proliferación bacteriana, conservándolos durante un mayor tiempo y ofreciendo un producto en mejores condiciones. Además la integración de un sistema de compra y venta automático en el prototipo, el cual se basa en dispositivos de aceptación de pago electrónicos, aumenta la efectividad del proceso de venta, logrando mayor disponibilidad del producto hacia el cliente y un proceso fácil de compra.

En la primera sección de este documento se presentan los conceptos más importantes que se tendrán en cuenta para el diseño de ingeniería, además la descripción de los dispositivos que conformaran cada uno de los sistemas del prototipo.

En la segunda parte se expone el proceso de desarrollo del diseño del prototipo. Se plantean los requerimientos generales para el diseño y construcción del prototipo, siguiendo con el diseño de detalle de cada uno de los sistemas. Concluyendo con las respectivas pruebas del funcionamiento de los sistemas del prototipo, y posterior validación de resultados.

En la parte final, se realiza el presupuesto general del diseño y construcción del prototipo de dispensador automático de productos lácteos refrigerados.

## 1. OBJETIVOS

### 1.1. OBJETIVO GENERAL

Continuar con los objetivos misionales de la Universidad Industrial de Santander y de la Escuela de Ingeniería Mecánica, en la aplicación del conocimiento, para el diseño y fabricación de un prototipo de máquina dispensadora de productos lácteos automatizada, para lograr una mejor rentabilidad al propietario y facilitar la compra al consumidor final.

#### 1.1.1 Objetivos Específicos

- Diseñar un prototipo de dispensador automático de productos lácteos debidamente refrigerados, para una capacidad de almacenamiento en dos tanques de 20 y 60 litros, en base a la integración de los siguientes subsistemas:
  - Sub-sistema de almacenamiento y bombeo: constituido por los tanques en acero inoxidable de 20 y 60 litros de capacidad en los que estarán los productos lácteos, y dos bombas, las cuales suministrarán a través de mangueras hasta el tubo dispensador la cantidad requerida por el consumidor.
  - Sub-sistema de refrigeración: conformado por un compresor, condensador, evaporador y tubo capilar; este sistema impedirá la proliferación bacteriana en los productos lácteos, por almacenamiento a temperaturas superiores a los 6 [°C].
  - Sub-sistema de control automático: sistema encargado de acondicionar las señales captadas a partir del dinero suministrado por el consumidor a través de un monedero y billetero electrónico, adecuándolas mediante

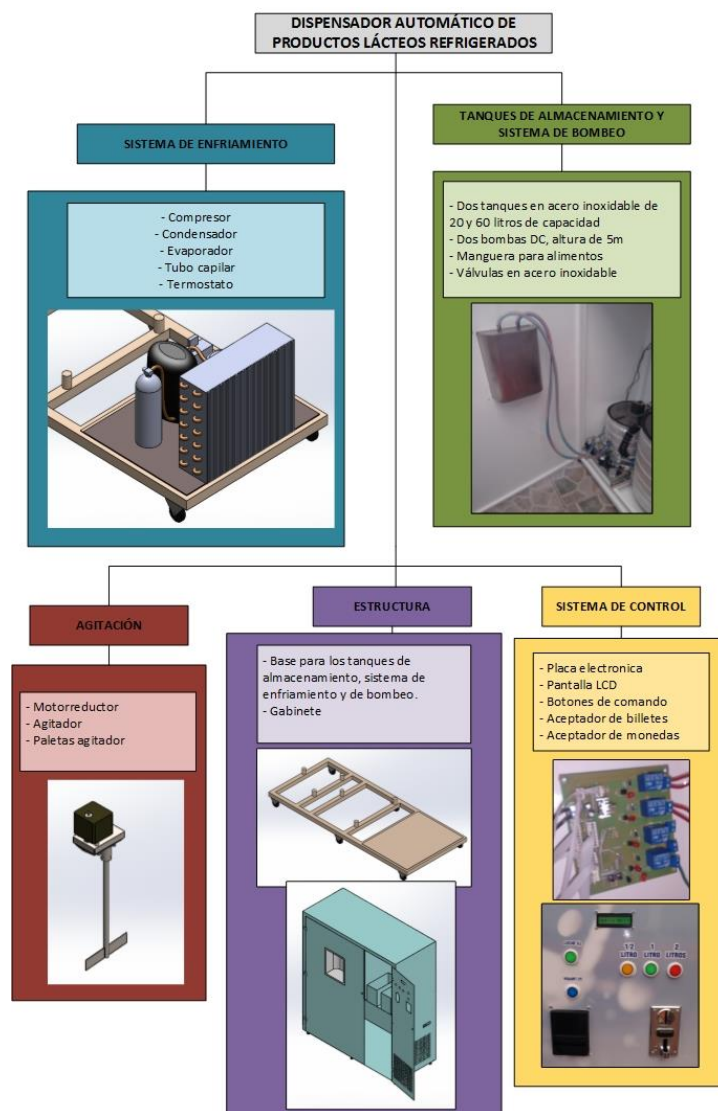
una tarjeta de control programada, para la habilitación de las bombas que permitirán el flujo del producto de acuerdo a la cantidad solicitada.

- Hacer un diseño óptimo de la estructura y gabinete en cuanto a material y configuración, mediante un análisis en ANSYS del peso total a soportar debido a los dispositivos de los sistemas que conforman el prototipo.
- Realizar los planos referentes a los componentes y ensamble del prototipo.
- Elaborar el presupuesto requerido para la construcción del dispensador automático de productos lácteos refrigerados.
- Construir un prototipo del dispensador de acuerdo al diseño realizado.
- Desarrollar un plan de mantenimiento preventivo y manual para la operación del prototipo.

## 2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL DISPENSADOR AUTOMÁTICO DE PRODUCTOS LÁCTEOS REFRIGERADOS

En la figura 1, se presenta de manera general una breve descripción de los elementos que conforman el dispensador automático de productos lácteos refrigerados.

Figura 1. Descripción general del dispensador automático de productos lácteos refrigerados.



Integración de los subsistemas para la conformación del dispensador automático de productos lácteos refrigerados.

Figura 2. Dispensador automático de productos lácteos refrigerados.



## 2.1. LECHE CRUDA

Es un producto natural producido por las hembras de los mamíferos, es uno de los alimentos más completos, ya que contiene gran riqueza alimenticia. La leche de vaca es la más utilizada alrededor del mundo para consumo humano, por lo que al paso del tiempo se ha desarrollado y depurado tecnología para la explotación de la leche, y la producción de sus derivados. La leche cruda se obtiene higiénicamente de la extracción manual o mecánica.

## 2.2. LA PASTEURIZACION

La pasteurización<sup>1</sup> es la operación a la que se someten determinados productos alimenticios para destruir por acción del calor los microorganismos patógenos y la mayoría de los gérmenes restantes, con fines higiénicos o de conservación, preservando al máximo las características físicas, bioquímicas y organolépticas del producto.

La pasteurización a baja temperatura (de 63 a 65°C durante 30 minutos), ha sido sustituida prácticamente por la pasteurización a alta temperatura (de 72 a 75°C durante 15 minutos). Después de la pasteurización la leche debe conservarse a una temperatura no superior a los 4°C, debido a que el método de la pasteurización solo destruye las formas vegetativas y no las esporuladas. Esta también es la razón por la cual la leche pasteurizada se debe consumir en un periodo de tiempo no superior al mes, al contrario que leche UHT que ha sido esterilizada en su totalidad, destruyendo formas vegetativas y esporuladas, por lo que dura más tiempo.

---

<sup>1</sup> CELIS, Mauricio, y JUAREZ, Daniel. Microbiología de la leche. Seminario de procesos fundamentales físico-químicos y microbiológicos. Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional – edUTecNe. 2009. p. 23.

### 2.3. PROPIEDADES FÍSICAS DE LA LECHE

Las principales propiedades de la leche pasteurizada<sup>2</sup> se pueden ver en la tabla 1.

Tabla 1. Propiedades físicas de la leche.

PROPIEDADES	VALOR (Unidades - SI)
Densidad	1028 - 1034 [Kg/m <sup>3</sup> ]
Ph	6,5 - 6,65
Viscosidad	0,0017 - 0,0022 [Kg/m-s]
Punto de congelación	0,513 y 0,565 [°C]
Punto de ebullición	100,17 [°C]
Calor específico	3,894 - 3,936 [KJ/Kg-°C]
Conductividad térmica	0,548 [W/m-°C]

Fuente. CELIS, M, & JUAREZ, D. Microbiología de le leche. 2009, p. 5.

### 2.4. ENFRIAMIENTO DE LA LECHE PASTEURIZADA

Con relación a la seguridad y calidad de la leche fresca, el tiempo y la temperatura de distribución son factores determinantes. La tasa de deterioración es duplicada para cada aumento de 2 °C en la temperatura<sup>3</sup>.

---

<sup>2</sup> *Ibid.*, p. 5.

<sup>3</sup> VATNE, K. B, y CASTBERG, H. B. (1991). Processing and packaging aspects of extended shelf-life products. Australian Journal of Dairy Technology. V. 46, p. 98-100.

Tabla 2. Efecto de la temperatura de almacenamiento en la vida útil de leche pasteurizada.

TEMPERATURA DE ALMACENAMIENTO	VIDA UTIL (Días)
2	40
4	20
6	10
8	5
10	2,5
12	1,25

Fuente. VATNE & CASTBERG. Processing and packaging aspects of extended shelf-life products.

## 2.5. MÁQUINAS EXPENDEDORAS

Hoy en día, las máquinas vending ofrecen casi cualquier servicio o producto, los cuales van desde un café que corresponda con los gustos del cliente, hasta cámaras fotográficas, medicamentos, teléfonos móviles, etc.

El sistema tradicional de activación de las máquinas vending<sup>4</sup> es por medio de monedas. Sin embargo, hoy en día la tecnología ha evolucionado hasta desarrollar nuevos sistemas dentro de los que se incluyen: billetes, fichas especiales denominadas “tokens”, tarjetas bancarias, sistemas de prepago e incluso mediante señales de teléfonos móviles.

---

<sup>4</sup> CUARTAS, Juliana, CARDENAS, Ana, MURILLO, Claudia, VALDERRAMA, Carlos, y VELEZ, José. Plan de mercadeo, Cinema 24. Especialización Gerencia de Mercadeo. Universidad CES – Rosario. Medellín 2011. p. 27.

## Dispensadores, elementos de autoservicio y otros objetos automatizados de uso público<sup>5</sup>

Entre estos elementos encontramos productos de distinta complejidad de uso y grado de automatización: cajeros automáticos, máquinas reguladoras como los parquímetros, de venta de contenidos muy diversos que se recogen bajo el término “vending” (tiquets, flores, souvenirs, regalos, refrescos y alimentos envasados, etc.) y también máquinas que permiten el consumo directo de líquidos (café, leche, etc.), ver figura 3. En los últimos tiempos estos elementos han proliferado en distintos contextos de uso público con la finalidad de ofrecer un servicio permanente de abastecimiento en régimen de autoservicio, que no exige el espacio ni el personal de una instalación comercial.

Figura 3. Distintos tipos de objetos de uso público soportes para servicios automatizados.



Fuente. PUYUELO, M, &, MERINO, L. Diseño e interacción en dispensadores y otros elementos automatizados de uso público. p. 3

En sus distintas versiones estos productos presentan algunas características comunes que interesan desde la perspectiva del diseño que son:

---

<sup>5</sup> PUYUELO CAZORLA, Marina, y MERINO SANJUÁN, Lola. Diseño e interacción en dispensadores y otros elementos de uso público. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Diseño. Universidad Politécnica de Valencia. p. 3.

- Ofrecen un servicio o producto.
- Requieren de un interlocutor para activarse con el que establecer la comunicación (Input\_Out put).
- Ofrecen una interfaz general de identificación de contenido general y uso particular. La visualización global del elemento es importante.
- Localización del o los accionamientos.
- Precisan de pulsadores, botones o sistema digital de accionamiento.
- Disponen de mecanismos de respuesta visual, sonora para la interacción con el usuario.
- Han de proporcionar información complementaria al uso

## **2.6. TRANSFERENCIA DE CALOR**

Es el intercambio de energía térmica entre cuerpos que se encuentran a temperaturas diferentes. La transferencia de energía siempre se produce del medio que tiene la temperatura más elevada hacia el de temperatura más baja y esa transferencia se detiene cuando ambos alcanzan la misma temperatura.

### **2.6.1. Transferencia de calor por conducción**

Si existe un gradiente de temperatura en una sustancia el calor puede fluir sin que tenga lugar un movimiento observable de la materia. En los sólidos metálicos la conducción de calor resulta del movimiento de los electrones no ligados y existe una estrecha relación entre la conductividad térmica y eléctrica.

En sólidos que son malos conductores de la electricidad, y en la mayor parte de los líquidos, la conducción de calor se debe al transporte de la cantidad de movimiento de las partículas individuales a lo largo del gradiente de temperatura. En gases la conducción se produce por el movimiento al azar de las moléculas, de forma que el calor “*difunde*” desde las zonas más calientes a las más frías.

La conducción en estado estable unidireccional se describe por la ley de Fourier<sup>6</sup>:

$$q = -(KA) \frac{dt}{dx}$$

Dónde:

$q$  : Transferencia de calor

$K$  : Conductividad térmica, [W/m-°C]

$A$  : Área normal al flujo, [m<sup>2</sup>]

$\frac{dt}{dx}$  : Gradiente de temperatura, [°C/m]

Si se integra la ecuación anterior a lo largo de segmentos con flujo de calor uniforme, sin generación en régimen permanente se obtiene:

$$q = \left( \frac{\Delta t}{R} \right)$$

$q$  : Transferencia de calor

$\Delta t$  : Diferencia de temperaturas, [K]

$R$  : Resistencia térmica, [K/W]

### **Resistencia térmica por conducción**

- Resistencia de pared plana

$$R_p = \frac{e}{K * A}$$

---

<sup>6</sup> CENGEL, Yunus A. Transferencia de Calor y Masa: Un Enfoque Práctico. 3 ed. México, D.F: McGraw-Hill/ Interamericana Editores, S.A, 2007. p. 18.

$e$  : Espesor de la pared normal al flujo, [m]

$K$  : Conductividad térmica, [W/m-°C]

$A$  : Área de transferencia, [m<sup>2</sup>]

- Resistencia de pared en cilindros

$$R_t = \frac{\ln(R_2/R_1)}{2\pi * L * K}$$

$R_2$  : Radio exterior del cilindro, [m]

$R_1$  : Radio interior del cilindro, [m]

$L$  : Longitud del cilindro, [m]

- Resistencia convectiva en paredes y tubos

$$R_c = \frac{1}{h * A}$$

$h$  : Coeficiente convectivo, [W/m<sup>2</sup>-K]

### **2.6.2. Transferencia de calor por convección**

Cuando una corriente o una partícula macroscópica (que se puede ver a simple vista) de materia cruza una superficie específica, tal como el límite de un volumen específico, lleva consigo una determinada cantidad de energía asociada “entalpía”. Este flujo de entalpía recibe el nombre de flujo convectivo de calor o simplemente convección. Puesto que la convección es un fenómeno macroscópico, solamente puede ocurrir cuando actúan fuerzas sobre la partícula o la corriente de fluido y mantienen su movimiento frente a las fuerzas de fricción. Desde el punto de vista termodinámico la convección no es considerada como un flujo de calor sino como un flujo de entalpía.

La convección se denomina forzada<sup>7</sup> si el fluido es obligado a fluir sobre una superficie mediante medios como un ventilador, una bomba etc. por el contrario, si el movimiento del fluido es causado por las fuerzas de empuje inducidas por las diferencias de densidades debidas a la variación de temperaturas en el fluido, la convección es natural.

Entre las propiedades de la superficie que intervienen en la convección están la geometría y la aspereza. El tipo de flujo, laminar o turbulento, también influye en la velocidad de transferencia de calor por convección.

La influencia de las propiedades del fluido, de la superficie y del flujo se cuantifica en el coeficiente de película o coeficiente de transferencia de calor por convección.

La transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura y se expresa mediante la ley de enfriamiento de Newton<sup>8</sup> como:

$$q = h * A * (T_s - T_\infty)$$

Dónde:

$h$  : Coeficiente de transferencia de calor por convección, [W/m<sup>2</sup>-°C] ó [Btu/h-ft-°F]

$A$  : Área superficial a través de la cual se da la transferencia de calor, [m<sup>2</sup>]

$T_s$  : Temperatura de la superficie, [°C]

$T_\infty$  : Temperatura del fluido, [°C]

---

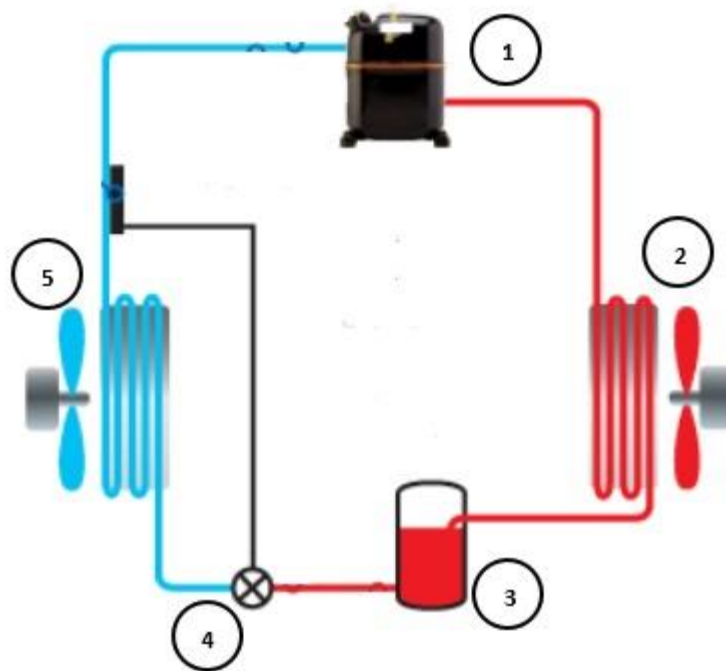
<sup>7</sup> CENGEL, Yunus A. Transferencia de Calor y Masa: Un Enfoque Práctico. 3 ed. México, D.F: McGraw-Hill/ Interamericana Editores, S.A, 2007. p. 26.

<sup>8</sup> *Ibid.*, p. 26.

## 2.7. REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR

Un sistema de refrigeración por compresión de vapor necesita de una unidad mecánica que facilite el cambio de estado del fluido refrigerante, con el fin de absorber el calor del cuerpo o espacio a enfriar y expulsarlo al ambiente. La figura 4, muestra el sistema de compresión de vapor.

Figura 4. Sistema de refrigeración por compresión de vapor.



El sistema cuenta con los siguientes componentes:

1. **Compresor:** su principal función es succionar el fluido refrigerante a baja presión de la línea de succión, y comprimirlo en dirección del condensador a alta presión y alta temperatura en la fase gaseosa (vapor sobrecalentado).
2. **Condensador:** posee la función de liberar el calor absorbido por el evaporador y por el proceso de compresión para el medio ambiente. En este proceso el fluido refrigerante proveniente del compresor está a alta presión y alta temperatura. Durante el recorrido del fluido refrigerante por el condensador,

ocurre la transformación del estado físico del fluido refrigerante de vapor sobrecalentado para líquido, subenfriado, a alta presión.

3. **Recibidor líquido:** hecho para ser el lugar de almacenamiento del refrigerante. Si la instalación está en operación, el recibidor está casi vacío. Si la instalación para y el sistema de vaciado está instalado, el refrigerante se almacena en el recibidor.
4. **Dispositivo de expansión:** cuya función es medir la cantidad apropiada de refrigerante usada en el evaporador y reducir la presión del líquido que llega al evaporador de tal modo que la vaporización del líquido se efectúa a la temperatura deseada.
5. **Evaporador:** es un componente que tiene la finalidad de retirar el calor que recibe del fluido refrigerante en el estado líquido, a baja presión y temperatura, proveniente del elemento de expansión. En esta condición, el fluido refrigerante se evapora absorbiendo el calor de la superficie de la tubulación del evaporador, ocurriendo la transformación de líquido subenfriado para la fase de vapor saturado a baja presión.

## 2.8. FLUIDOS REFRIGERANTES

El fluido refrigerante es el elemento que lleva acabo la transferencia de calor en el sistema de refrigeración por compresión de vapor. De las propiedades del refrigerante empleado dependerá en gran parte el buen desempeño del equipo.

Un refrigerante ideal debe presentar las siguientes características<sup>9</sup>:

- Calor latente de vaporización elevado.
- Baja relación de compresión.
- Punto de ebullición a la presión atmosférica suficientemente bajo.
- Temperatura critica muy alta.

---

<sup>9</sup> Manual for Refrigeration servicing Technicians. p. 32. Disponible en: [http://www.unep.org/pdf/7443-e-Ref\\_manual\\_servicing\\_technicians.pdf](http://www.unep.org/pdf/7443-e-Ref_manual_servicing_technicians.pdf)

- Bajo volumen específico del vapor saturado.
- Composición química estable dentro de las condiciones de operación de la máquina.
- No debe reaccionar químicamente con el lubricante empleado para el compresor.
- No debe reaccionar químicamente con las partes metálicas del equipo, ni sobre las juntas.
- No debe ser perjudicial para la salud.
- No debe ser inflamable ni explosivo en contacto con el aire.
- Ninguna afinidad con la composición del aire.
- Fugas fáciles de detectar.
- Fácil aprovisionamiento.
- Coste poco elevado.
- Ninguna acción sobre la capa de ozono.

## **2.9. SISTEMA DE AGITACIÓN**

### **2.9.1. Tanques agitados**

El agitador tiene que cumplir varias misiones, siendo las más importantes<sup>10</sup>:

- Evitar la formación de hielo en la leche.
- Aumentar las corrientes de convección para que la temperatura sea homogénea en toda la masa de leche contenida en el tanque.

El agitador debe estar perfectamente diseñado y construido, con una velocidad de rotación bien estudiada para evitar que se produzcan salpicaduras y espuma, que aumentan la superficie de contacto de la leche con el aire, puesto que la tensión superficial en la zona de contacto entre el aire y la leche produce rotura de las

---

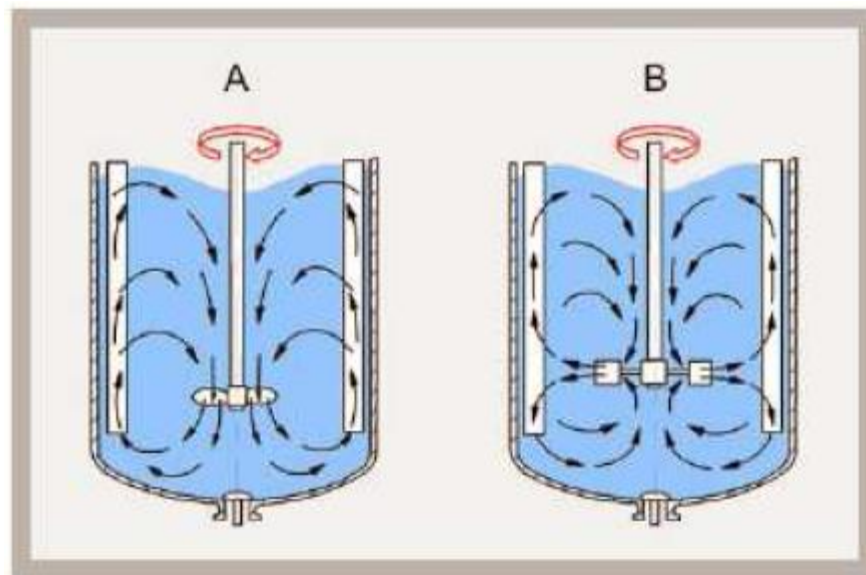
<sup>10</sup> Refrigeración de la leche. p. 7. Disponible en: [http://ocw.upm.es/produccion-animal/ordenomecanico/Tema\\_5\\_Refrigeracion\\_de\\_la\\_leche/tema\\_05-\\_refrigeracion\\_de\\_la\\_leche\\_en\\_granja.pdf](http://ocw.upm.es/produccion-animal/ordenomecanico/Tema_5_Refrigeracion_de_la_leche/tema_05-_refrigeracion_de_la_leche_en_granja.pdf)

membranas de los glóbulos de la grasa, que queda en libertad, aumentando el riesgo de lipólisis.

### 2.9.2. Rodetes

Los agitadores de rodete se dividen en dos clases: los que generan corrientes paralelas al eje del rodete y aquellos que generan corrientes en dirección tangencial o radial. Los primeros reciben el nombre de rodetes de flujo axial, y los segundos de flujo radial, como se muestra en la figura 5.

Figura 5. Formas de agitación: axial (A) y radial (B).



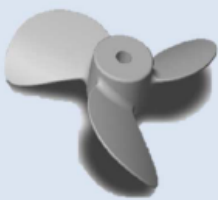
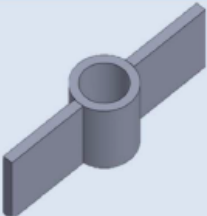

Fuente: <http://es.slideshare.net/JoseLuisBrunelli/agitadores-25010350>

### 2.9.3. Tipos de rodete

Los tres principales tipos de rodetes son hélices, palas y turbinas, ver figura 6. Cada uno de ellos comprende muchas variantes y subtipos que no se considerarán aquí. Otros rodetes especiales resultan también útiles en situaciones

especiales, pero los tres tipos principales mencionados resuelven tal vez el 95%<sup>11</sup> de todos los problemas de agitación de líquidos.

Figura 6. Tipos de rodete.

	Hélice	Palas	Turbina
<b>Forma</b>			
<b>Movimiento</b>	Radial.	* Radial y tangencial placas verticales. * Radial tangencial y longitudinal placas inclinadas.	Radial y tangencial.
<b>Velocidad de operación</b>	* 1150 – 1750 rpm para hélices pequeñas. * 400 – 800 rpm para hélices grandes.	Velocidades Bajas o moderadas: 20 – 150 rpm.	Altas velocidades.
<b>Aplicación</b>	Tanques muy grandes.	* Tanques medianos * Tanques pequeños.	Líquidos de baja viscosidad.
<b>Dimensiones y forma</b>	* $\phi$ rodete: 18 pulg de diámetro. * 2 o más hélices en tanques profundos.	* $\phi$ rodete: 50 – 80 % diámetro interior del tanque. * Pueden ser inclinadas o verticales.	* $\phi$ rodete: 30 – 50% diámetro interior del tanque. * Numerosas palas cortas

Fuente. McCABE, SMITH, & HARRIOT. Operaciones unitarias en ingeniería química.

Para tanques de capacidad media-baja, el rodete más adecuado es el de palas verticales.

<sup>11</sup> McCABE, Warren L. SMITH, Julian C y HARRIOT, Peter. Operaciones unitarias en ingeniería química. 6 edición. McGraw-Hill. México, D.F. 2007. p. 244.

### 3. REQUERIMIENTOS GENERALES DE DISEÑO

El dispensador automático de productos lácteos, tendrá la capacidad de almacenar leche y yogurt en tanques de 60 y 20 litros respectivamente, en un rango de temperatura de 4-6°C, con el fin de mantener los productos en condiciones óptimas para el consumo humano. Sistema automático de cobro monedero-billetero y control electrónico para la dispensación de los productos según lo solicitado por los clientes.

#### 3.1. ORGANIZACIÓN DE REQUERIMIENTOS

Con el fin de atender los requisitos descritos para el posterior diseño ingenieril, se listan en la tabla 3, las directrices planteadas por el usuario:

Tabla 3. Requerimientos del usuario y recomendaciones para el diseño ingenieril.

CRITERIO	REQUERIMIENTO GENERAL	CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO INGENIERIL
COSTOS	Bajo costo del prototipo	Selección de materiales para construcción de los tanques, estructura de soporte y del gabinete de menor costo, donde se debe optar por el mínimo calibre de lámina cumpliendo con la funcionalidad del proceso. Adquirir componentes eléctricos de operación de baja potencia.
DESEMPEÑO	Almacenamiento de 60 litros de leche y 20 litros de yogurt	El dispensador debe tener la capacidad de almacenar 60 litros de leche y 20 litros de yogurt, en material adecuado para productos alimenticios.
	Refrigeración de los tanques de almacenamiento a 4-6°C.	Se debe implementar un sistema de refrigeración, que permita mantener los productos en un rango de temperatura de 4-6 °C.
	Sistema de pago electrónico	El dispensador debe ofrecer la posibilidad de pago en billetes y monedas.

NORMATIVIDAD	Cumplimiento de normas para el diseño y construcción de los tanques de almacenamiento	Se debe cumplir con las especificaciones planteadas en normas nacionales como internacionales que ofrezcan directrices apropiadas para el diseño y construcción de los tanques.
OPERACIÓN	Facilidad de operación	El dispensador debe ser de fácil operación por parte de los clientes.
	Energía de fácil acceso.	Adquisición de componentes eléctricos que operen a una tensión de 110V.
	Fácil desplazamiento de los componentes estructurales.	Se debe diseñar la estructura y el gabinete de tal manera que su desplazamiento sea sencillo y posibilite un oportuno mantenimiento.
VIDA UTIL	Todos los componentes del sistema deben tener un ciclo de operación relativamente alto.	En cuanto al diseño de estructuras de soporte, se debe utilizar materiales de alta resistencia a la corrosión. Los dispositivos electrónicos deben ser diseñados con alta calidad para funcionar un tiempo prolongado.

### 3.2. SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

El sistema de refrigeración debe conservar los productos lácteos dentro de los tanques de almacenamiento en un rango de temperaturas de 4-6°C. El diseño del evaporador es muy importante ya que será el encargado de extraer la carga térmica del sistema.

Se analizaron dos opciones para el diseño e instalación del evaporador más adecuado para la refrigeración de los productos lácteos almacenados.

1. **Evaporador de serpentín en el interior de los tanques:** La superficie externa del serpentín estará en contacto directo con el producto almacenado al interior de los tanques. Las ventajas son:

- Mayor transferencia de calor desde el producto hacia el refrigerante.

- Disminución de longitud de tubería del evaporador.

Desventajas:

- Riesgos de contaminación, ya que por la tubería circulará refrigerante, lo cual aumenta el riesgo de contaminar el producto almacenado.
- Aumento de costos en el material para formar el serpentín, se debe usar acero inoxidable.
- Interviene con la limpieza interior de los tanques, se haría necesario al realizar las labores de limpieza de los tanques la evacuación del evaporador.

2. **Evaporador de serpentín en el exterior de los tanques:** La superficie externa del serpentín estará en contacto directo con la superficie del tanque.

Las ventajas son:

- No hay riesgos de contaminar el producto almacenado.
- Menores costos en el material a emplear.
- Se emplea cobre el cual es un buen conductor térmico.
- Facilita las labores de limpieza de los tanques.

Desventajas:

- Aumenta la cantidad de tubería debido a la disminución de la capacidad de retirar la carga térmica en el tiempo determinado.

Una de las principales premisas para el desarrollo del proyecto es la seguridad al almacenar y dispensar los productos lácteos, garantizando la salud de los consumidores. Por lo tanto se opta por la alternativa del evaporador al exterior de los tanques.

### 2.3 TANQUES DE ALMACENAMIENTO

Los tanques de almacenamiento están diseñados y construidos de tal forma que se pueda mantener el producto en las mejores condiciones. Los componentes de un tanque de refrigeración deben cumplir ciertas características, para conservar

los productos lácteos a una temperatura adecuada, conservando las propiedades de dichos productos.

Para las especificaciones de diseño de los tanques se toman como referencia dos normas principales.

Según la Norma Colombiana NTC 3559<sup>12</sup>, se señalan las principales recomendaciones de diseño en tanques de almacenamiento y transporte de leche:

- **Lámina del tanque:** la lámina del tanque debe ser fabricada con acero inoxidable, bien sea del grado 304 S15 o del grado 316 S16.
- **Soldadura:** la soldadura debe realizarse ya sea por el proceso MIG o por el proceso TIG.
- **Superficie y acabado interno:** todas las superficies internas que entran en contacto con el contenido del tanque deben ser accesibles a la inspección y deben diseñarse y construirse de modo que las superficies en contacto con la leche o con las soluciones limpiadoras, se puedan drenar, limpiar y desinfectar.

La segunda norma consultada brinda parámetros más acordes de acuerdo a la capacidad de los tanques que se pretenden diseñar, por lo tanto se resumen los apartados más importantes de acuerdo a la Norma Ecuatoriana<sup>13</sup> para la instalación y servicio de tanques refrigerados de leche.

- **Dimensiones:** en esta parte se especifican las dimensiones más importantes para el diseño del tanque:

---

<sup>12</sup> NORMA TECNICA COLOMBIANA NTC 3559. Transporte, Especificaciones para tanques de transporte de leche y sus derivados líquidos. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). Apartado 14237. Bogotá D.C.

<sup>13</sup> CÓDIGO DE PRÁCTICA ECUATORIANO, INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN. CPE INEN 007, (1983). Código de práctica para instalación y servicio de tanques refrigerados para leche. Quito Ecuador. p. 6.

- La altura del tanque, desde el nivel del piso hasta la parte superior del cuerpo, debe ser menor o igual a 1400 mm.
  - Entre el nivel del piso y el punto más bajo del tanque debe haber por lo menos 150 mm, en el caso de tanques de anchura igual o menor a 1800 mm.
  - La sección horizontal puede ser rectangular o circular, de tal manera que cuando el tanque esté a su máxima capacidad, el nivel de leche esté por lo menos a 65 mm bajo el borde superior.
- **Construcción del tanque:** las uniones, soporte, drenajes, aislamientos y otros considerados en el diseño del tanque de refrigeración deben tener las siguientes características:
    - Los cordones de suelda que tengan contacto con la leche como es el caso del puente y el recipiente interior, deberán tener una superficie cóncava lisa de radio mínimo igual a 5 mm.
    - Los accesorios y elementos que no son fijos deben, ser fácilmente desmontables para efectos de limpieza y esterilización.
    - El tanque debe ser aislado tanto en las paredes como en el fondo del recipiente, tal que la temperatura superficial del contenido en el recipiente interior no sobrepase los 10°C, y el aumento de la temperatura media del contenido no exceda a 3°C.
    - El espacio entre el reborde de la abertura y el borde de la tapa correspondiente no debe exceder de 2mm, además cada tapa debe tener una agarradera para facilitar su manipulación.
    - Las esquinas interiores del recipiente deben tener un radio mínimo de 12 mm.
    - Cuando la leche evacue el tanque, el residuo que aún queda en el recipiente no debe exceder el 1% de su capacidad.
    - El orificio de salida para la leche debe tener un diámetro de por lo menos 38 mm y estar situado en el fondo del recipiente.

### 3. DISEÑO DE LOS TANQUES DE ALMACENAMIENTO Y SISTEMA DE AGITACIÓN

#### 3.1 DISEÑO GEOMÉTRICO DE LOS TANQUES

El material recomendado por las normas citadas anteriormente en el cual se fabricarán los tanques de almacenamiento, el rodete, palas y soporte del sistema de agitación, es el acero inoxidable ASTM A-240/A-240M grado 304.

En primer lugar se determinan las dimensiones de los dos tanques.

Los tanques de almacenamiento de los productos lácteos dentro del dispensador, estarán sometidos internamente a una intermitente agitación con el objetivo de obtener una temperatura uniforme en todo el producto, debido al enfriamiento producido por la unidad condensadora, por lo tanto se sobredimensionan el volumen de los tanques en relación a la capacidad requerida inicialmente, impidiendo un posible derrame del producto y un margen a la hora de depositar la cantidad requerida de tal manera que no haya un rebose del líquido.

#### Tanque de leche

$$V_{inicial} = 60 \text{ [Litros]} = 0,06 \text{ [m}^3\text{]}$$

Tomando un exceso en la capacidad del tanque del 20%<sup>14</sup>.

$$V_{diseño} = 1,2 * 0,06 = 0,072 \text{ [m}^3\text{]}$$

Para el diseño de la geometría del tanque, se toma la siguiente recomendación de diseño<sup>15</sup>:

---

<sup>14</sup> GONZALES GONZALES, Nancy Consuelo y ROJAS ANNICCHIARICO, Cindy Dayana. Diseño conceptual de un fermentador para la producción de N-Butanol a partir de glucosa empleando clostridium acetobutylicum ATCC 824. Trabajo de grado para Ingeniero Químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. 2011. p. 33.

$$H = D_i$$

$$V_{diseño} = \frac{\pi}{4} * D_i^2 * H$$

$$D_i = H = 0,451 [m]$$

### **Tanque de yogurt**

$$V_{inicial} = 20 [Litros] = 0,020 [m^3]$$

$$V_{diseño} = 1,2 * 0,020 = 0,024 [m^3]$$

$$D_i = H = 0,313 [m]$$

## **3.2 ANÁLISIS ESTÁTICO DE LOS TANQUES**

En los tanques de almacenamiento de los productos lácteos no se presentará grandes presiones, estos solo soportan las presiones hidrostáticas provocadas por el peso de la leche y el yogurt. Para la construcción de los tanques se escogió láminas de acero inoxidable comercial calibre 18 (1.21 mm) cumpliendo con una buena resistencia, costo, además de su facilidad a la hora de trabajarlo. Después haciendo un análisis en ANSYS, se verifica la resistencia de cada tanque con la carga impuesta por el fluido en reposo.

---

<sup>15</sup> McCABE, Warren L. SMITH, Julián C y HARRIOT, Peter. Operaciones unitarias en ingeniería química. 7 ed. McGraw-Hill. México, D.F. 2007. p. 262.

Figura 7. Resultados en ANSYS de los esfuerzos, deformaciones y factor de seguridad tanque almacenamiento de leche.

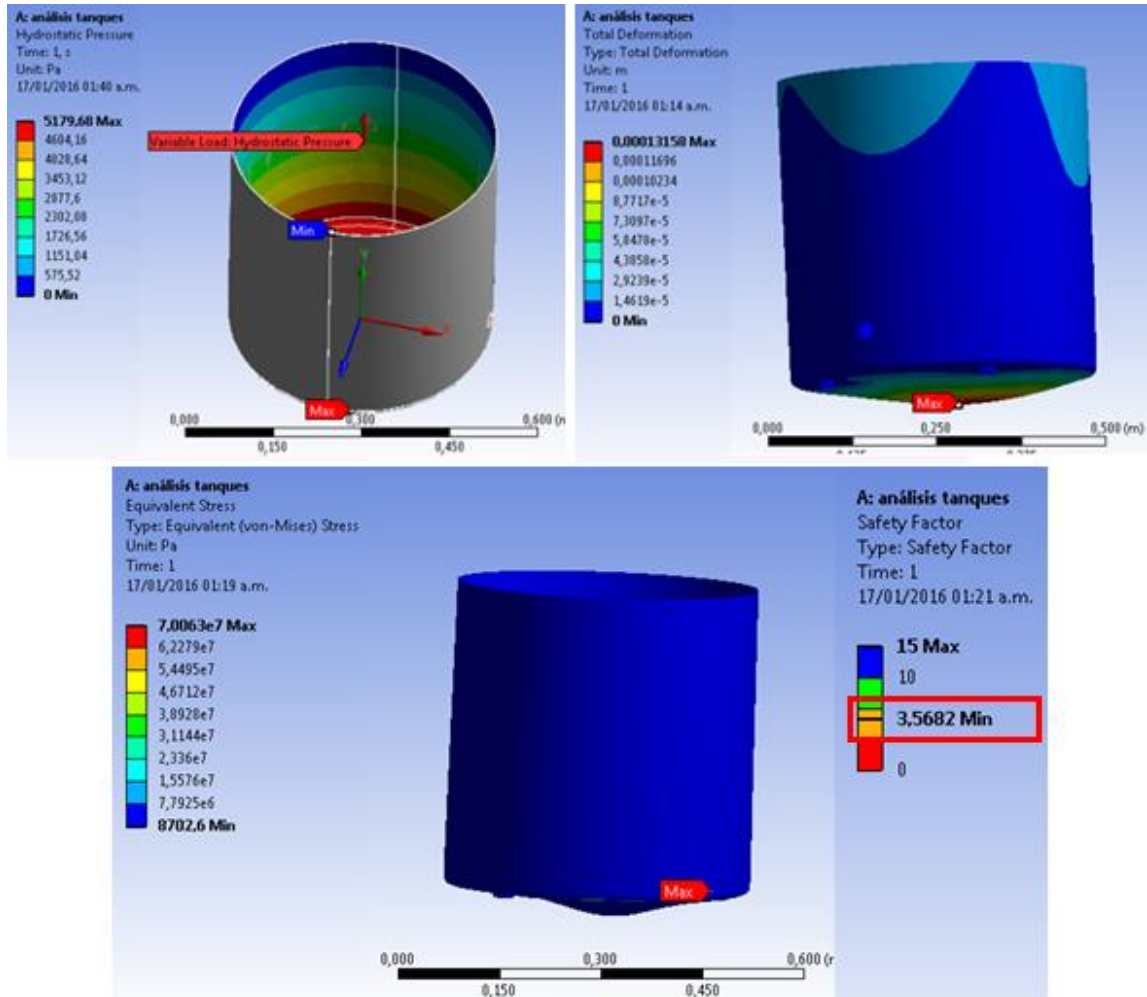
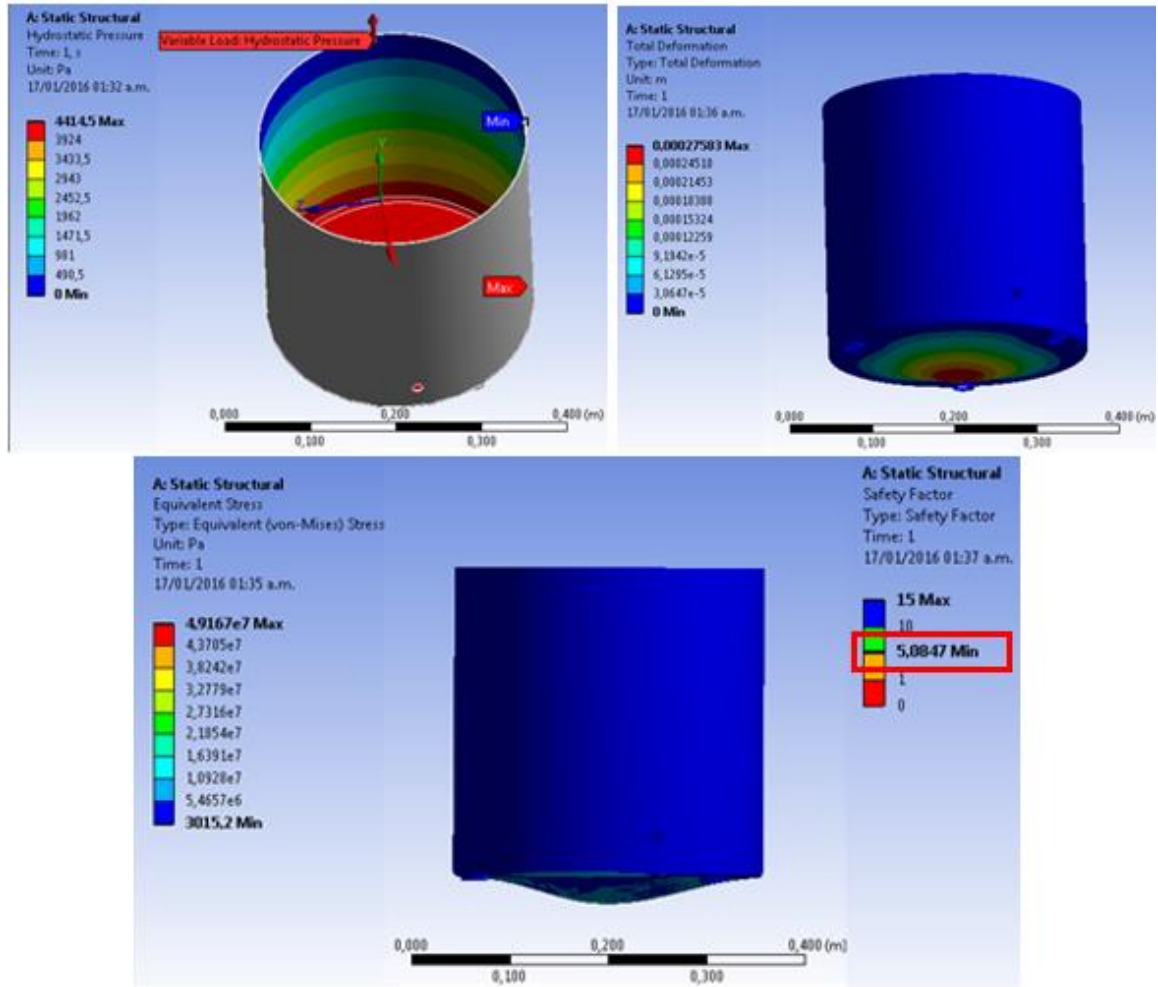


Figura 8. Resultados en ANSYS de los esfuerzos, deformaciones y factor de seguridad tanque almacenamiento de yogurt.



Los tanques no presentan ningún problema por las cargas impuestas del fluido en reposo, para ambos casos los esfuerzos de Von Mises están por debajo de la resistencia a la fluencia del acero inoxidable comercial.

En el proceso de enfriamiento llevamos el producto de 12°C hasta 4°C, en un tiempo de 2 horas. Si analizamos los posibles esfuerzos térmicos por los efectos de dilatación o contracción causados por el cambio de temperatura, en los libros consultados se puede asegurar que no existe riesgo de fallas por esfuerzos térmicos por las siguientes razones:

- Las temperaturas a las que se realizan pruebas de fatiga inician en variaciones de temperatura desde 365°C para que se puedan observar efectos de dilatación térmica y temperaturas bajo cero para tener efectos por castración térmica. Las variaciones de temperatura tienen que ser demasiado grandes para poder observar fallas, y en caso la mayor temperatura que maneja los tanques es la temperatura del ambiente 26°C y la menor 4°C.
- Los ciclos de trabajo en el proceso de enfriamiento son muy bajos, el proceso de bajar la temperatura de la leche y el yogurt de 12°C a 4°C se realiza máximo 3 o 4 veces por día, siguiendo con un sostenimiento en un rango de 4°C a 6°C de los productos. Las fallas se presentan por encima de los 1000 ciclos y con grandes variaciones de la temperatura.

### **3.3 DISEÑO DEL SISTEMA DE AGITACIÓN**

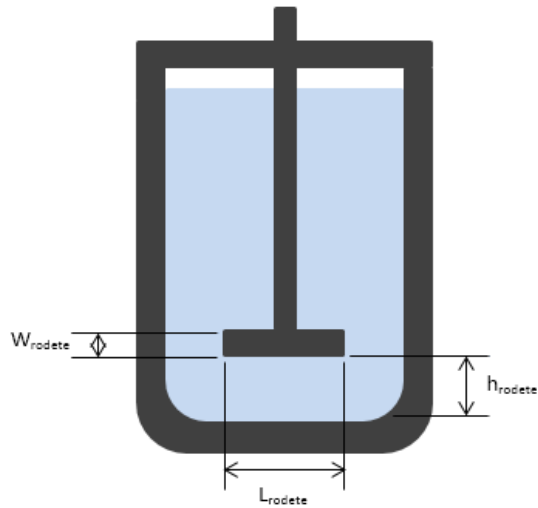
#### **3.3.1 Dimensionamiento y ubicación del agitador**

Conociendo el diámetro interior del tanque, se deducen las distancias y dimensiones para la longitud y ubicación del rodete<sup>16</sup>, las principales dimensiones se observan en la figura 9.

---

<sup>16</sup> McCABE, Warren L. SMITH, Julián C y HARRIOT, Peter. Operaciones unitarias en ingeniería química. 7 ed. McGraw-Hill. México, D.F. 2007. p. 262.

Figura 9. Diseño agitador.



Longitud del rodete:

$$L_{rodete} = \frac{1}{3} * D_i$$

$$L_{rodete} = \frac{1}{3} * 0,451m = 0,15 [m]$$

Altura del rodete a la base interior del tanque:

$$h_{rodete} = \frac{1}{3} * D_i$$

$$h_{rodete} = \frac{1}{3} * 0,451 m = 0,15 [m]$$

Ancho de la paleta del rodete:

$$W_{rodete} = \frac{1}{5} * L_{rodete}$$

$$W_{rodete} = \frac{1}{5} * 0,15 m = 0,03 [m]$$

### 3.3.2 Aspectos importantes para seleccionar el motor-agitador

El principal aspecto a tener en cuenta es el cálculo de la potencia de motor que se requiere para mover el sistema de agitación (eje y rodete). Las velocidades de rotación para tanques de almacenamiento de gran capacidad, están comprendidas entre 20 a 30 rpm. Este rango es debido a que si la velocidad de agitación fuera inferior, la composición química de los productos lácteos no sería uniforme y no se lograría una buena agitación, provocando diferenciales de temperatura importantes entre el líquido en contacto con la superficie interior de los tanques y el líquido contenido en el centro de los recipientes, por otro lado, si la velocidad fuera superior las propiedades químicas de la leche serán alteradas.

### 3.3.3 Potencia mecánica del moto-reductor

La potencia requerida se calcula dependiendo de si el flujo es laminar o turbulento, con lo cual se determina primero el número de Reynolds<sup>17</sup>.

$$N_{Re} = \frac{L_{rodete}^2 * RPS * \rho_{leche}}{\mu_{leche}}$$

Dónde:

*RPS*: Velocidad de agitación del rodete (rev/s).

$\mu_{leche}$ : Viscosidad dinámica de la leche (Kg/m-s).

La velocidad a la cual se agita la leche no debe ser demasiado alta puesto que generaría una alta producción de espuma (RPM>200) como consecuencia de la entrada de aire en el producto, por tanto se elige una velocidad de agitación de 20 RPM, donde se evita la alteración de las propiedades del producto y se mantiene un coeficiente de transferencia de calor alto.

---

<sup>17</sup> McCABE, Warren L. SMITH, Julián C y HARRIOT, Peter. Operaciones unitarias en ingeniería química. 7 ed. McGraw-Hill. México, D.F. 2007. p. 274.

$$N_{Re} = \frac{(0,15 \text{ m})^2 * \left(\frac{20 \text{ rev}}{60 \text{ s}}\right) * \left(1032 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}\right)}{0,00195 \frac{\text{Kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}}$$

$$N_{Re} = 3969$$

Una vez determinado el régimen de flujo dentro del tanque de almacenamiento, se calcula la potencia requerida a partir del número de potencia (arrastre del rodete) y del flujo generado. La ecuación para hallar la potencia<sup>18</sup> es:

$$P_m = N_p * RPS^3 * L_{rodete}^5 * \rho_{leche}$$

Dónde:

$P_m$ : Consumo de potencia mecánica [Kw].

$N_p$ : Numero de potencia (Adimensional).

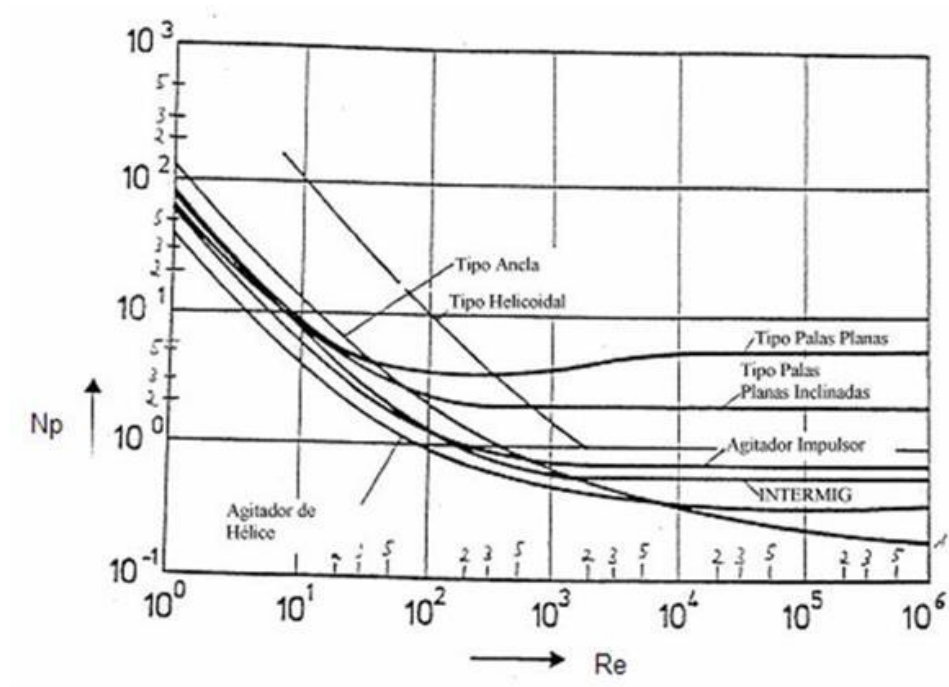
$RPS$ : Revoluciones por segundo a las que gira el rodete.

El valor del número de potencia se determina mediante graficas que están en función del número de Reynolds, teniendo en cuenta la relación entre la longitud de la paleta y el ancho del tanque, y también de la forma del rodete, ver figura 10. Como se ha elegido anteriormente el tipo de rodete es de palas planas, con una relación entre el ancho y la longitud de la paleta de 1/5.

---

<sup>18</sup> *Ibid.*, p. 277.

Figura 10. Numero de potencia vs Numero de Reynolds.



Fuente. <http://biofermentaciones.blogspot.com/> png

$$N_p \approx 5$$

Potencia de agitación

$$N_p = \frac{Pot_{agitacion}}{RPS^3 * L_{rodete}^5 * \rho_{leche}}$$

$$Pot_{agitacion} = 5 * \left(\frac{20}{60}\right)^3 * 0,15^5 * 1032 = 0,01451 [W]$$

Dividiendo en la eficiencia del motor, tomando esta del 50%.

$$Pot_{motor} = \frac{Pot_{agitacion}}{n_{motor}}$$

$$Pot_{motor} = 0,03193 [W]$$

La potencia necesaria para llevar a cabo la agitación al interior del tanque es muy baja, como consecuencia de la baja viscosidad de la leche y el tamaño del equipo el cual es pequeño.

### 3.3.4 Selección del motorreductor

Según los cálculos anteriores la potencia necesaria para llevar a cabo la agitación es muy pequeña, por lo tanto se seleccionó un motorreductor de baja potencia, de alimentación de corriente alterna (110v) de 1/20 hp, de bajo costo y que cumpla con una velocidad de rotación requerida. Las especificaciones de los motores seleccionados se encuentran en (ANEXO A).

- Velocidad: 25 [rpm]
- Torque nominal: 21,5 [lb-in] = 2,43 [N-m]
- Voltaje: 110 [V]

Figura 11. Motorreductor 25 RPM.



Fuente. <http://www.merkle-korff.com/products/acparallelshaft.asp>

### 3.3.5 Determinación del diámetro del eje del agitador.

Mediante la norma ASME, se calcula el diámetro del eje teniendo en cuenta las propiedades del material utilizado, la carga a la cual trabajará y el tipo de eje si es macizo o hueco.

Propiedades del material<sup>19</sup>:

- **Material:** Acero inoxidable grado 304
- **Esfuerzo a la fluencia:**  $S_y = 241 [MPa]$
- **Esfuerzo ultimo:**  $S_{ut} = 586 [MPa]$

Torque al cual está sometido el eje.

$$T = 21,5 [lb - in] = 2,43 [N - m]$$

El eje a usar es un eje macizo, donde se determinará el diámetro de dicho eje mediante un proceso iterativo, cumpliendo con la siguiente condición de diseño:

$$\tau_{macizo} < \tau_{permisible}$$

El esfuerzo permisible será el menor valor, teniendo en cuenta los esfuerzos de fluencia y último del material utilizado.

$$\tau_{permisible1} = 0,3 * S_y = 7,23 * 10^7 [Pa]$$

$$\tau_{permisible2} = 0,18 * S_{ut} = 10,54 * 10^7 [Pa]$$

Se calcula el esfuerzo del eje macizo.

$$\tau_{macizo} = 16 * T * \frac{K_T}{\pi * D_{eje}^3}$$

Donde:

$K_T$ : Factor de carga de torsión, (carga repentina en ejes que rotan = 1,5)

---

<sup>19</sup> MOTT, Robert L. Diseño de Elementos de Máquinas. Cuarta Edición. Pearson Educación, México, 2006. p. 405.

Se asume un diámetro del eje para el proceso iterativo. El siguiente diámetro  $D_{eje}=3/8$  [pg], cumple con los criterios planteados y comercialmente su adquisición se facilita.

$$\tau_{macizo} = 2,148 * 10^7 [Pa]$$

$$\tau_{macizo} < \tau_{permisible1}$$

Con lo cual el diámetro asumido cumple con los requisitos planteados.

### 3.3.6 Determinación del espesor de las paletas del agitador.

Potencia que soporta cada paleta:

$$Pot_{paleta} = \frac{Pot_{agitacion}}{No\ de\ paletas} = \frac{0,02834}{2} = 0,01417 [W]$$

Torque que soporta cada paleta:

$$T_{paleta} = \frac{Pot_{paleta}}{\omega_{agitador}} = \frac{0,01417}{25 * \frac{\pi}{30}} = 0,005413 [N - m]$$

Fuerza en cada paleta:

$$F_{paleta} = \frac{T_{paleta}}{r_{rodete}} = \frac{0,001386}{\frac{0,15}{2}} = 0,07218 [N]$$

Espesor de la paleta:

$$e_{paleta} = \sqrt{6 * F_{paleta} * \frac{\frac{L_{rodete}}{2}}{W_{rodete} * 0,5 * S_y}} = 9,5 * 10^{-5} [m]$$

Como la fuerza generada en cada paleta es muy pequeña el espesor necesario también lo es, por lo tanto se considera una lámina calibre 26 (0,6 [mm]).

## 4 DISEÑO TÉRMICO

### 4.1 CARGA TÉRMICA DE LA LECHE

Se debe tener en cuenta las temperaturas de ingreso y la temperatura a la cual se van a conservar los productos lácteos, de tal manera que sus propiedades no sean alteradas, y se logre mantener en óptimas condiciones tanto la leche como el yogurt durante un tiempo prolongado.

#### 4.1.1 Temperatura de ingreso de la leche

La leche que se almacenará en los tanques previamente es pasteurizada mediante una micropasteurizadora<sup>20</sup>, la cual una vez tratada térmicamente se le realiza un proceso de refrigeración bajando la temperatura a 4°C. La manipulación y disposición del usuario para cargar los productos lácteos tanto la leche como el yogurt en los tanques del dispensador eleva la temperatura de dichos productos en promedio a 12°C. Por lo tanto se toma esta temperatura como la temperatura de ingreso en los tanques de almacenamiento del dispensador para realizar los cálculos térmicos siguientes.

#### 4.1.2 Temperatura de conservación

La temperatura de conservación de los productos lácteos en el interior de los tanques de almacenamiento estará en el rango de 4-6 °C. En base al diseño del sistema de refrigeración adecuado se tomará la temperatura mínima de 4°C, asegurando que dicho sistema pueda retirar la carga térmica cuando la transferencia de calor desde el ambiente es la mayor.

---

<sup>20</sup> CALDERÓN REMOLINA, Juanpablo y DÍAZ TOLOZA, Hugo Armando. Diseño y construcción de un prototipo de micro pasteurizadora tipo batch. Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2015.

### 4.1.3 Temperatura del ambiente exterior

La instalación del prototipo se realizará en el departamento del Huila, donde la temperatura promedio oscila entre los 24 y 28 °C<sup>21</sup>, para efectos de cálculos se tomará la temperatura del ambiente exterior de 26 °C.

Masa de leche:

$$M_{leche} = V_{leche} * \rho_{leche}$$

$$M_{leche} = (0,06 \text{ m}^3)(1032 \text{ Kg/m}^3)$$

$$M_{leche} = 61,92 \text{ [Kg]}$$

Como es un mantenimiento de los productos lácteos a una temperatura de conservación, y no hay cambio de fase, el cálculo de la carga térmica por producto se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{leche} = M_{leche} * Cp_{leche} * \frac{T_{i;leche} - T_{f;leche}}{t_{enf}}$$

Donde:

$Cp_{leche}$ : Capacidad calórica de la leche.

$T_{i;leche}$ : Temperatura de ingreso de la leche.

$T_{f;leche}$ : Temperatura final de la leche.

$t_{enf}$ : Tiempo de enfriamiento de la leche – 2 horas.

$$Q_{leche} = (61,92 \text{ Kg}) * \left(3915 \frac{\text{J}}{\text{Kg} - ^\circ\text{C}}\right) * \frac{(12 - 4)^\circ\text{C}}{7200 \text{ s}}$$

$$Q_{leche} = 269,4[\text{W}]$$

---

<sup>21</sup> Gobernación del Huila. Relieve y clima. Disponible en: <http://www.huila.gov.co/conoce-el-huila/relieve-y-clima.html>

## 4.2 TRANSFERENCIA DE CALOR A TRAVÉS DE LAS SUPERFICIES DEL TANQUE

Con el cálculo de la carga térmica del volumen del producto a conservar, en el diseño basado en la transferencia de calor de los tanques de almacenamiento, se presenta ganancia de calor desde el ambiente, el cual estará a una temperatura mayor a la temperatura de conservación en el interior de los tanques, este flujo de energía ocurre a través de las superficies del tanque, las cuales se determinan a continuación.

### 4.2.1 Aislante térmico

Cuando el tanque de almacenamiento trabaja a una temperatura diferente a la temperatura ambiente, ya sea por encima o debajo de ella, es necesario aislarlo térmicamente reduciendo la transferencia de calor hacia o desde el ambiente, para mantener el producto en buenas condiciones.

El aislante térmico es importante por los siguientes aspectos:

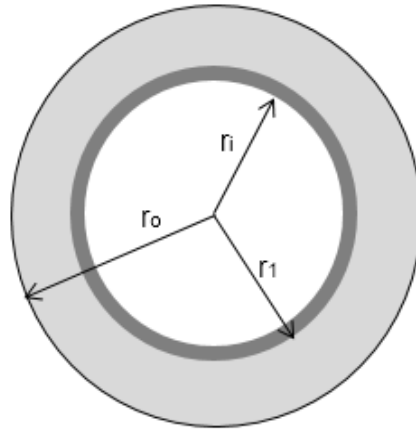
- Se produce ahorro energético.
- Evita la pérdida o ganancia de calor en los alimentos ya que deben conservarse a temperaturas adecuadas.
- Evita la condensación de la humedad ambiental sobre la superficie del tanque.

#### **Espesor del Aislante:**

Mediante la iteración del espesor del aislante, se busca obtener el mejor rendimiento en cuanto la reducción del calor transferido desde el ambiente. El aislamiento de los tanques se realizará con lámina de thermolón.

- Conductividad térmica:  $K_{aislante} = 0,04 \left[ \frac{W}{m-K} \right]$

Figura 12. Radios geométricos del cilindro.



- Radio interno del cilindro:

$$r_i = 0,2255 \text{ [m]}$$

- Radio interno del cilindro + espesor del acero:

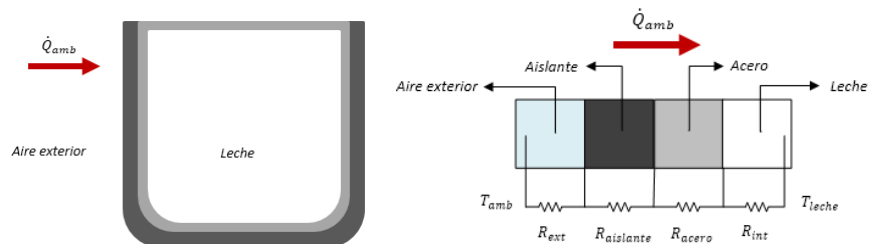
$$r_1 = 0,2255 + 0,00121 = 0,2267 \text{ [m]}$$

- Radio interno del cilindro + espesor del acero + espesor del aislante:

$$r_0 = 0,2255 + 0,00121 + e_{\text{aislante}}$$

Se plantean las resistencias térmicas para el análisis de transferencia de calor de los tanques de almacenamiento.

Figura 13. Resistencias térmicas paredes del tanque.



## Coeficientes de transferencia de calor

Para el cálculo de las resistencias térmicas es necesario tener en cuenta los coeficientes convectivos tanto en el interior como en el exterior de los tanques de almacenamiento.

- **Coeficiente convectivo en el interior del tanque.**

En el cálculo del coeficiente de transferencia de calor convectivo en el interior del tanque, se usan las relaciones para recipientes con agitación mecánica<sup>22</sup>.

$$\frac{h_i D_j}{K} = 0,36 \left( \frac{L^2 N \rho}{\mu} \right)^{\frac{2}{3}} \left( \frac{c \mu}{K} \right)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0,14}$$

Dónde:

$h_i$ : Coeficiente convectivo al interior del tanque, [BTU/h-ft<sup>2</sup>-°F]

$D_j$ : Diámetro del tanque, [ft]

$K$ : Conductividad térmica de la leche, [BTU/h-ft-°F]

$L$ : Longitud del rodete, [ft]

$N$ : Revoluciones por hora a las que gira el agitador, [RPH]

$\rho$ : Densidad de la leche, [lb/ft<sup>3</sup>]

$\mu$ : Viscosidad dinámica de la leche, [lb/ft-h]

$c$ : Calor específico de la leche, [BTU/lb-°F]

$\mu_w$ : Viscosidad dinámica del agua, [lb/ft-h]

---

<sup>22</sup> KERN, DONALD Q. Procesos de Transferencia de Calor. México D.F. CECSA. 1999. p. 815.

Se toma una relación entre viscosidades del agua y la leche igual a 1, debido a la semejanza en sus propiedades.

$$h_i = \frac{0,36 * 0,3166}{1,48} \left( \frac{0,4921^2 * 1200 * 64,34}{4,709} \right)^{\frac{2}{3}} \left( \frac{0,9349 * 4,709}{0,3166} \right)^{\frac{1}{3}} (1)^{0,14}$$

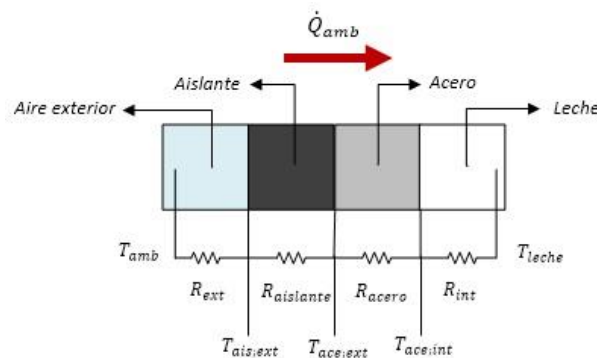
$$h_i = 53,9 \left[ \frac{BTU}{h - ft^2 - ^\circ F} \right] = 306,1 \left[ \frac{W}{m^2 - ^\circ K} \right]$$

### 4.3 GANANCIA DE CALOR DESDE EL AMBIENTE A TRAVES DE LA SUPERFICIE CILINDRICA DEL TANQUE

#### Cálculo de la temperatura de película del aire exterior

Para encontrar la temperatura de película se toma como referencia el instante en el cual se presenta la mayor ganancia de calor desde el ambiente hacia el producto interno almacenado, lo cual ocurre a la temperatura de conservación de 4°C de los productos.

Figura 14. Resistencias térmicas análisis temperatura de película.



Ecuaciones para el análisis:

$$T_{amb} = 26 [^{\circ}C]$$

$$T_{leche} = 4 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$Q_{amb} = \frac{(T_{amb} - T_{ais;ext})}{R_{ext}}$$

$$Q_{amb} = \frac{(T_{ais;ext} - T_{ace;ext})}{R_{aislante}}$$

$$Q_{amb} = \frac{(T_{ace;ext} - T_{ace;int})}{R_{acero}}$$

$$Q_{amb} = \frac{(T_{ace;int} - T_{leche})}{R_{int}}$$

Las propiedades del aire son tomadas a la temperatura de película del aire exterior.

$$T_f = \frac{T_{ais;ext} + T_{amb}}{2}$$

### **Coeficiente convectivo natural en el exterior del tanque**

Para el cálculo del coeficiente convectivo se siguen las ecuaciones para convección natural sobre superficies, tomando la configuración geométrica de los tanques como placas verticales<sup>23</sup>.

$$Gr_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2}$$

Donde las propiedades del aire son tomadas a la temperatura de película:

*g*: Aceleración gravitacional, [m/s<sup>2</sup>]

---

<sup>23</sup> CENGEL, Yunus A. Transferencia de Calor y Masa: Un Enfoque Práctico. 3 ed. México D.F: McGraw-Hill/ Interamericana Editores, S.A, 2007. p. 511.

$\beta$ : Coeficiente de expansión volumétrica, [1/K]

$T_s$ : Temperatura de la superficie, [°C]

$T_\infty$ : Temperatura del fluido, [°C]

$L_c$ : Longitud característica de la configuración geométrica, [m]

$\rho_{aire}$ : Densidad del aire exterior de la tapa [Kg/m<sup>3</sup>]

$\mu_{aire}$ : Viscosidad dinámica del aire exterior [Kg/m-s]

$\nu_{aire}$ : Viscosidad cinemática del aire exterior [m<sup>2</sup>/s]

$K_{aire}$ : Conductividad térmica [W/K-m]

$Cp_{aire}$ : Calor específico [J/Kg-C]

Condición para tratar al cilindro como una placa vertical:

$$D \geq \frac{35L}{Gr_L^{\frac{1}{4}}}$$

$$D \geq \frac{35 * 0,451}{5,091 * 10^{\frac{1}{4}}}$$

$$D \geq 0,1869$$

Longitud característica

$$L_c = 0,45 [m]$$

Numero de Rayleigh

$$Ra_L = Gr_L * Pr$$

Numero de Prandtl

$$Pr = \frac{Cp_{aire} * \mu_{aire}}{K_{aire}}$$

### **Cálculo de la resistencia de convección al exterior del tanque**

$$R_{ext} = \frac{1}{h_{est} * A_{ext}}$$

Área exterior del tanque:

$$A_{ext} = 2 * \pi * r_o * (H_i)$$

### **Cálculo de la resistencia de convección interna**

$$R_{int} = \frac{1}{h_{int} * A_{int}}$$

Área interior del tanque:

$$A_{int} = 2 * \pi * r_i * H_i$$

### **Transmisión de calor por conducción**

Resistencia del Acero inoxidable aisi 304.

$$R_{acero} = \frac{\ln\left(\frac{r_1}{r_i}\right)}{2\pi * K_{acero} * H_i}$$

Resistencia del aislante.

$$R_{aislante} = \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_1}\right)}{2\pi * K_{aislante} * H_i}$$

Las ecuaciones planteadas anteriormente se resuelven iterando el espesor del aislante a utilizar, donde se analiza teniendo en cuenta la transferencia de calor desde el ambiente y la facilidad para la instalación. La variación del espesor va

desde 1/8 de pulgada hasta 2 pulgadas, resaltando que comercialmente se consigue laminas hasta de 1 pulgada, los valores mayores a este es mediante la adición de dos láminas de aislante. Los resultados se observan en la tabla 4.

Tabla 4. Ganancia de calor desde el ambiente en función del espesor del aislante.

1..10	1 $e_{\text{aislante}}$ [m]	2 $Q_{\text{amb}}$ [W]
Run 1	0,00317	35,31
Run 2	0,00635	29,06
Run 3	0,0127	21,76
Run 4	0,0191	17,54
Run 5	0,0254	14,82
Run 6	0,0286	13,77
Run 7	0,0317	12,9
Run 8	0,0381	11,44
Run 9	0,0445	10,3
Run 10	0,0508	9,412

La tabla muestra que para un espesor de 1 pulgada, la reducción del flujo de calor es bastante en consideración con el espesor mínimo, y a partir del espesor de 1 pulgada la disminución del flujo de calor es pequeña. Por tanto la elección de un espesor mayor no implica diferencias tan grandes y además dificulta la instalación, ya que se necesita adicionar otra lámina de aislante. Por tanto se elige una lámina de aislante de 1 pulgada de espesor (0,0254 m).

A continuación se resuelven las ecuaciones una vez calculada la temperatura de película del aire y las respectivas propiedades a dicha temperatura, siguiendo con el cálculo de la transferencia de calor desde el ambiente a través de la superficie cilíndrica del tanque.

Radio exterior del tanque.

$$r_0 = 0,2255 + 0,00121 + e_{\text{aislante}} = 0,2255 + 0,00121 + 0,0254 = 0,2521 \text{ [m]}$$

Temperatura de película del aire exterior:

$$T_f = \frac{T_{ais;ext} + T_\infty}{2} = \frac{17,96 + 26}{2} = 21,98 [C]$$

Número de Grashof

$$Gr_L = \frac{g\beta(T_\infty - T_s)L_c^3}{\nu^2} = \frac{9,81 * 0,003388(26 - 17,96) * 0,45^3}{0,00002194^2} = 5,06 * 10^7$$

Número de Prandtl

$$Pr = \frac{Cp_{aire} * \mu_{aire}}{K_{aire}} = \frac{1004 * 0,00001835}{0,02529} = 0,7285$$

Número de Rayleigh

$$Ra_L = Gr_L * Pr = 5,06 * 10^7 * 0,7285 = 3,68 * 10^7$$

Según el número de Rayleigh calculado está en el intervalo de  $10^4$ - $10^9$ , por lo tanto el número de Nusselt<sup>24</sup>:

$$Nu = 0,59Ra_L^{\frac{1}{4}} = 0,59 * (3,68 * 10^7)^{\frac{1}{4}} = 46$$

Coeficiente convectivo exterior

$$h_{ext} = \frac{K_{aire} * Nu}{L_c} = \frac{0,02529 * 46}{0,45} = 2,58 \left[ \frac{W}{m^2 - ^\circ K} \right]$$

### **Cálculo de la resistencia de convección al exterior del tanque**

Área exterior del tanque:

---

<sup>24</sup> CENGEL, Yunus A. Transferencia de Calor y Masa: Un Enfoque Práctico. 3 ed. México, D.F: McGraw-Hill/ Interamericana Editores, S.A, 2007. p. 511.

$$A_{ext} = 2 * \pi * r_o * (H_i) = 2 * \pi * (0,2521 \text{ m}) * (0,45 \text{ m})$$

$$A_{ext} = 0,714 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$R_{ext} = \frac{1}{h_{est} * A_{ext}} = \frac{1}{\left(2,58 \frac{W}{m^2 - ^\circ C}\right) * (0,714 \text{ m}^2)}$$

$$R_{ext} = 0,5428 \left[ \frac{^\circ C}{W} \right]$$

### Cálculo de la resistencia de convección interna

Área interior del tanque:

$$A_{int} = 2 * \pi * r_i * H_i = 2 * \pi * (0,2255 \text{ m}) * (0,45 \text{ m})$$

$$A_{int} = 0,639 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$R_{int} = \frac{1}{h_{int} * A_{int}} = \frac{1}{\left(306,1 \frac{W}{m^2 - ^\circ C}\right) * (0,639 \text{ m}^2)}$$

$$R_{int} = 0,00511 \left[ \frac{^\circ C}{W} \right]$$

### Transmisión de calor por conducción

Resistencia del Acero inoxidable aisi 304.

$$R_{acero} = \frac{\ln\left(\frac{r_1}{r_i}\right)}{2\pi * K_{acero} * H_i} = \frac{\ln\left(\frac{0,2267 \text{ m}}{0,2255 \text{ m}}\right)}{2\pi * \left(14,9 \frac{W}{m - ^\circ C}\right) * (0,45 \text{ m})}$$

$$R_{acero} = 0,0001267 \left[ \frac{^\circ C}{W} \right]$$

Resistencia del aislante.

$$R_{aislante} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi * K_{aislante} * H_i} = \frac{\ln\left(\frac{0,2521 \text{ m}}{0,2267 \text{ m}}\right)}{2\pi * \left(0,04 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}\right) * (0,451 \text{ m})}$$

$$R_{aislante} = 0,9369 \left[ \frac{^\circ C}{W} \right]$$

Suma de resistencias en el cilindro

$$\sum R_{cilindro} = R_{int} + R_{acero} + R_{aislante} + R_{ext}$$

$$\sum R_{cilindro} = 1,484 \left[ \frac{^\circ C}{W} \right]$$

**Cálculo de la transferencia de calor de la superficie cilíndrica del tanque**

$$Q_{amb;cil} = \frac{\Delta_T}{\sum R_{cilindro}}$$

$\Delta_T$ : Diferencia de temperaturas entre el ambiente y el producto al interior del tanque.

$$Q_{amb;cil} = \frac{T_{amb} - T_{leche}}{\sum R_{cilindro}}$$

$$Q_{amb;cil} = \frac{(26 - 4)^\circ C}{1,484 \frac{^\circ C}{W}}$$

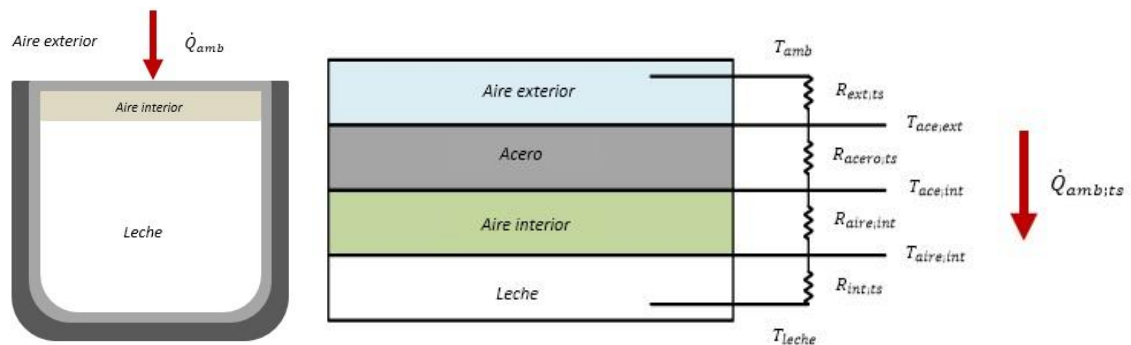
$$Q_{amb;cil} = 14,82 [W]$$

#### 4.4 GANANCIA DE CALOR DESDE EL AMBIENTE A TRAVÉS DE LA TAPA SUPERIOR DEL TANQUE

En este análisis se tiene en cuenta el volumen de aire del interior del tanque, el cual corresponde al volumen geométrico adicional que se tomó para el diseño geométrico de los tanques.

El procedimiento para calcular los coeficientes de transferencia de calor tanto del aire exterior e interior, analizando la superficie de la tapa superior de los tanques se pueden consultar en (ANEXO B).

Figura 15. Resistencias térmicas tapa superior.



#### Coeficiente de convección natural al exterior de la tapa

Numero de Grashof.

$$Gr_{ts} = \frac{g * \beta_{ts}(T_{amb} - T_{s;ts}) * Lc_{ts}^3}{v_{ts}^2}$$

Las propiedades del aire exterior son tomadas a la temperatura de película.

$$T_{f;ts} = \frac{T_{s;ts} + T_{amb}}{2}$$

$\beta_{ts}$ : Coeficiente de expansión volumétrica del aire exterior

$\rho_{ts}$ : Densidad

$\mu_{ts}$ : Viscosidad dinámica

$\nu_{ts}$ : Viscosidad cinemática

$K_{ts}$ : Conductividad térmica

$Cp_{ts}$ : Calor específico

Numero de Prandtl

$$Pr_{ts} = \frac{Cp_{ts} * \mu_{ts}}{K_{ts}}$$

Numero de Rayleigh

$$Ra_{ts} = Gr_{ts} * Pr_{ts}$$

Longitud característica de la tapa

$$Lc_{ts} = \frac{A_{superf}}{perimetro}$$

$$A_{superf} = \pi * r_i^2$$

$$perimetro = 2 * \pi * r_i$$

Coefficiente convectivo del aire exterior

$$h_{ext;ts} = \frac{K_{ts} * Nusselt_{ts}}{Lc_{ts}}$$

**Calculo del coeficiente de convección del aire en el interior del tanque**

Las propiedades del aire interior se calculan a la temperatura de película

$$T_{f;aireint} = \frac{T_{ace,int} + T_{aire,int}}{2}$$

Numero de Reynolds del aire en el interior del tanque.

$$Re_{aire,int} = \frac{\rho_{aire,int} * V_{prom} * L_{aire,int}}{\mu_{aire,int}}$$

Donde:

$\rho_{aire,int}$ : Densidad del aire a la temperatura de película del aire interior.

$L_{aire,int}$ : Longitud característica de la tapa.

$\mu_{aire,int}$ : Viscosidad dinámica a la temperatura de película del aire interior.

Velocidad promedio del aire.

$$V_{prom} = \omega_{agitador} * r_{med}$$

Donde:

$\omega_{agitador}$ : Revoluciones por segundo del agitador [rad/s]

$r_{med}$ : Radio medio del interior del tanque [m]

$$V_{prom} = 2,618 * 0,1128 = 0,2952 \left[ \frac{m}{s} \right]$$

Numero de Prandtl

$$Pr_{aire,int} = \frac{Cp_{aire,int} * \mu_{aire,int}}{K_{aire,int}}$$

Numero de Nusselt,

$$Nusselt_{aire,int} = 0,023 * Re_{aire,int}^{0,8} * Pr_{aire,int}^{0,4}$$

Coeficiente de convección del aire al interior del tanque.

$$h_{aire;int} = \frac{K_{aire;int} * Nusselt_{aire;int}}{D_i}$$

### Resistencias térmicas

Resistencia de convección del aire exterior.

$$R_{ext;ts} = \frac{1}{h_{ext;ts} * A_{ts}}$$

Área de la tapa superior.

$$A_{ts} = \pi * r_i^2 = \pi * 0,2255^2 = 0,1598 [m^2]$$

Resistencia de conducción del acero.

$$R_{acero;ts} = \frac{e_{acero}}{K_{acero} * A_{ts}}$$

Resistencia de convección del aire interior.

$$R_{aire;int} = \frac{1}{h_{aire;int} * A_{ts}}$$

Resistencia de convección interna.

$$R_{int;ts} = \frac{1}{h_{int} * A_{ts}}$$

Donde:

$h_{int}$ : Coeficiente de convección de la leche al interior del tanque.

A continuación se plantean las ecuaciones de transferencia de calor para el cálculo de la temperatura de película del aire tanto en el exterior como en el interior del tanque.

$$T_{amb} = 26 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$T_{leche} = 4 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$Q_{amb;ts} = \frac{(T_{amb} - T_{ace;ext})}{R_{ext;ts}}$$

$$Q_{amb;ts} = \frac{(T_{ace;ext} - T_{ace,int})}{R_{acero;ts}}$$

$$Q_{amb;ts} = \frac{(T_{ace,int} - T_{aire,int})}{R_{aire,int}}$$

$$Q_{amb;ts} = \frac{(T_{aire,int} - T_{leche})}{R_{int;ts}}$$

Resolviendo mediante EES (ANEXO B), obtenemos las temperaturas de película del aire exterior e interior, con las cuales evaluamos los coeficientes de transferencia de calor en el exterior e interior, procediendo al cálculo de las resistencias térmicas.

Temperatura de película aire exterior:

$$T_{f;ts} = \frac{T_{s;ts} + T_{amb}}{2} = \frac{14,4 + 26}{2} = 20,2 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Numero de Nusselt, se calcula teniendo en cuenta el número de Rayleigh:

$$Ra_{ts} = 839017$$

Se encuentra en el rango  $10^4$ - $10^7$ , para superficie caliente arriba<sup>25</sup>:

$$Nusselt_{ts} = 0,54 * Ra_{ts}^{1/4} = 16,34$$

Coeficiente de convección en el exterior de la tapa superior del tanque.

$$h_{ext;ts} = 3,646 \left[ \frac{W}{m^2 - K} \right]$$

Resistencia de convección al exterior del tanque.

$$R_{ext;ts} = \frac{1}{h_{ext;ts} * A_{ts}} = 1,717 \left[ \frac{K}{W} \right]$$

Las propiedades del aire en el espacio interior del tanque se toman a la temperatura de película:

$$T_{f,airint} = \frac{T_{ace;int} + T_{aireint}}{2} = \frac{14,4 + 4,138}{2} = 9,27 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Coeficiente de convección del aire en el espacio interior del tanque.

$$h_{aire;int} = 4,121 \left[ \frac{W}{m^2 - K} \right]$$

Resistencia de convección del aire en el espacio interno del tanque.

$$R_{aire;int} = \frac{1}{h_{aire;int} * A_{ts}} = 1,519 \left[ \frac{K}{W} \right]$$

Resistencia de conducción del acero.

$$R_{acero;ts} = \frac{e_{acero}}{K_{acero} * A_{ts}} = 0,0005083 \left[ \frac{K}{W} \right]$$

---

<sup>25</sup> CENGEL, Yunus A. Transferencia de Calor y Masa: Un Enfoque Práctico. 3 ed. México, D.F: McGraw-Hill/ Interamericana Editores, S.A, 2007. p. 511.

Resistencia de convección interna.

$$R_{int;ts} = \frac{1}{h_{int;ts} * A_{ts}} = 0,02045 \left[ \frac{K}{W} \right]$$

Suma de Resistencias en la tapa superior del tanque.

$$\sum R_{ts} = R_{ext;ts} + R_{acero;ts} + R_{aire;int} + R_{int;ts} = 3,25 \left[ \frac{K}{W} \right]$$

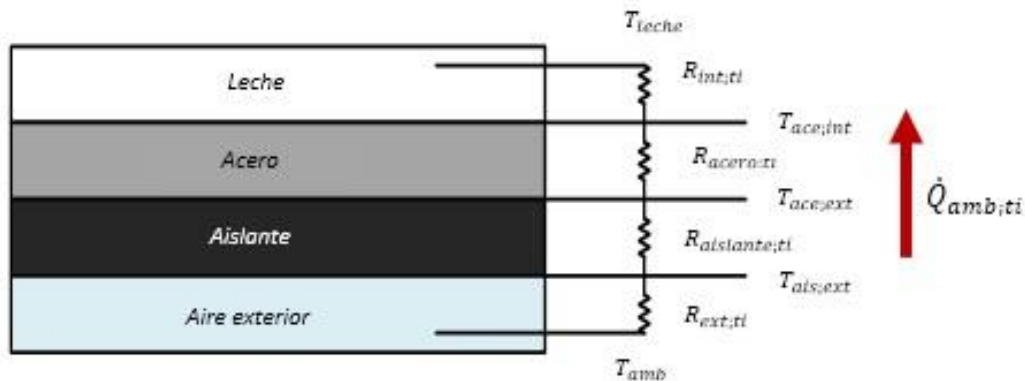
Cálculo de la transferencia de calor desde al ambiente a través de la tapa superior del tanque.

$$Q_{amb;ts} = \frac{T_{amb} - T_{leche}}{\sum R_{ts}} = 6,75 [W]$$

#### 4.5 GANANCIA DE CALOR DESDE EL AMBIENTE A TRAVES DE LA TAPA INFERIOR DEL TANQUE

En el análisis del calor transferido por la superficie inferior de tanque se tiene en cuenta el producto interno almacenado, la lámina de acero, la lámina de aislante y el aire del ambiente exterior. Las resistencias térmicas y las temperaturas superficiales se pueden ver en la figura 16.

Figura 16. Resistencias térmicas tapa inferior.



## Coeficiente de convección natural al exterior de la tapa

Numero de Grashof

$$Gr_{ts} = \frac{g * \beta_{ti}(T_{amb} - T_{ais;ext}) * L C_{ti}^3}{v_{ti}^2}$$

Las propiedades del aire exterior son tomadas a la temperatura de película.

$$T_{f;ti} = \frac{T_{ais;ext} + T_{amb}}{2}$$

$\beta_{ti}$ : Coeficiente de expansión volumétrica del aire exterior

$\rho_{ti}$ : Densidad del aire

$\mu_{ti}$ : Viscosidad dinámica

$\nu_{ti}$ : Viscosidad cinemática

$K_{ti}$ : Conductividad térmica

$Cp_{ti}$ : Calor específico

Numero de Prandtl

$$Pr_{ti} = \frac{Cp_{ti} * \mu_{ti}}{K_{ti}}$$

Numero de Rayleigh

$$Ra_{ti} = Gr_{ti} * Pr_{ti}$$

Numero de Nussel, superficie inferior de una placa<sup>26</sup>

$$Nusselt_{ts} = 0,27 * Ra_{ti}^{1/4}$$

Longitud característica de la tapa

$$Lc_{ts} = \frac{A_{superf}}{perimetro}$$

$$A_{superf} = \pi * r_i^2$$

$$perimetro = 2 * \pi * r_i = 0,1128 [m]$$

Coefficiente convectivo del aire exterior

$$h_{ext;ti} = \frac{K_{ti} * Nusselt_{ti}}{Lc_{ti}}$$

### Resistencias térmicas

Resistencia de convección del aire exterior.

$$R_{ext;ti} = \frac{1}{h_{ext;ti} * A_{ti}}$$

Área de la tapa inferior.

$$A_{ti} = \pi * r_i^2 = \pi * 0,2255^2 = 0,1598 [m^2]$$

Resistencia de conducción del acero.

$$R_{acero;ti} = \frac{e_{acero}}{K_{acero} * A_{ti}}$$

---

<sup>26</sup> CENGEL, Yunus A. Transferencia de Calor y Masa: Un Enfoque Práctico. 3 ed. México, D.F: McGraw-Hill/ Interamericana Editores, S.A, 2007. p. 511.

Resistencia de conducción del aislante.

$$R_{aislante;ti} = \frac{e_{acero}}{K_{acero} * A_{ti}}$$

Resistencia de convección interna.

$$R_{int;ti} = \frac{1}{h_{int} * A_{ti}}$$

Donde:

$h_{int}$ : Coeficiente de convección de la leche al interior del tanque.

Se definen las ecuaciones de transferencia de calor para el cálculo de la temperatura de película del aire exterior en la parte inferior del tanque.

$$T_{amb} = 26 [^{\circ}C]$$

$$T_{leche} = 4 [^{\circ}C]$$

$$Q_{amb;ti} = \frac{(T_{amb} - T_{ais;ext})}{R_{ext;ti}}$$

$$Q_{amb;ti} = \frac{(T_{ais;ext} - T_{ace;ext})}{R_{aislante;ti}}$$

$$Q_{amb;ti} = \frac{(T_{ace;ext} - T_{ace;int})}{R_{acero;ti}}$$

$$Q_{amb;ti} = \frac{(T_{ace;int} - T_{leche})}{R_{int;ti}}$$

Mediante EES (ANEXO B), obtenemos las temperaturas de película del aire exterior, con la cual evaluamos el coeficiente de transferencia de calor en el exterior, para proceder al cálculo de las resistencias térmicas.

Temperatura de película aire exterior:

$$T_{f;ti} = \frac{T_{ais;ext} + T_{amb}}{2} = \frac{15,68 + 26}{2} = 20,84 [C]$$

Coeficiente de convección en el exterior de la tapa inferior del tanque.

$$h_{ext;ti} = 1,773 \left[ \frac{W}{m^2 - K} \right]$$

Resistencia de convección al exterior del tanque.

$$R_{ext;ti} = \frac{1}{h_{ext;ti} * A_{ti}} = 3,53 \left[ \frac{K}{W} \right]$$

Resistencia de conducción del acero.

$$R_{acero;ti} = \frac{e_{acero}}{K_{acero} * A_{ti}} = 0,0005083 \left[ \frac{K}{W} \right]$$

Resistencia de conducción del aislante.

$$R_{aislante;ti} = \frac{e_{aislante}}{K_{aislante} * A_{ti}} = 3,975 \left[ \frac{K}{W} \right]$$

Resistencia de convección interna.

$$R_{int;ti} = \frac{1}{h_{int;ti} * A_{ti}} = 0,02045 \left[ \frac{K}{W} \right]$$

Suma de Resistencias en la tapa superior del tanque.

$$\sum R_{ti} = R_{ext;ti} + R_{aislante;ti} + R_{acero;ti} + R_{int;ti} = 7,529 \left[ \frac{K}{W} \right]$$

Cálculo de la transferencia de calor desde al ambiente a través de la tapa inferior del tanque.

$$Q_{amb;ti} = \frac{T_{amb} - T_{leche}}{\sum R_{ti}} = 2,92 [W]$$

**Calculo de la transferencia de calor total desde el ambiente a través de la superficie exterior del tanque**

$$Q_{amb} = Q_{amb;cil} + Q_{amb;ts} + Q_{amb;ti} = 24,49 [W]$$

#### **4.6 CALOR POR SERVICIO**

Se engloban en este apartado las ganancias de calor debidas a factores tales como la apertura de puertas y correspondiente renovación de aire, motores, etc.

Estas ganancias de calor están directamente relacionadas con el tamaño del tanque de almacenamiento<sup>27</sup>, y su cuantificación aproximada puede obtenerse como porcentaje de las ganancias de calor a través de las paredes.

El porcentaje a emplear en cada caso será:

- Pequeñas cámaras de conservación: 10%
- Detallistas: 25%
- Restaurantes, bares y pastelerías: 40%

Para el diseño de los tanques de almacenamiento teniendo en cuenta la baja capacidad para la leche y el yogurt, de 60 y 20 Litros respectivamente, tomamos un 10% de factor para el calor de servicio.

$$Q_{servicio} = 10\% * Q_{amb}$$

$$Q_{servicio} = 2,45 [W]$$

---

<sup>27</sup> FORMACION PROFESIONAL PRINCIPADO DE ASTURIAS. Técnico en montaje y mantenimiento de instalaciones de frío, climatización y producción de calor. Unidad 3: Selección de máquinas y equipos. p. 10.

#### 4.7 ENERGIA ALMACENADA EN LOS TANQUES Y EL MATERIAL AISLANTE

Se considera la energía que se almacena en el volumen de las láminas de acero y del material aislante.

$$Q_{acero} = m_{acero} * Cp_{acero} * \frac{\Delta T}{t}$$

Donde:

$m_{acero}$ : Masa de acero tanque de leche.

$Cp_{acero}$ : Calor específico del acero.

$\Delta T$ : Cambio de temperatura en el acero.

$t$ : Tiempo de enfriamiento.

$$Q_{acero} = 10,42Kg * 477 \frac{J}{Kg - K} * \left( \frac{22K}{7200s} \right) = 15,2 [W]$$

Energía almacenada en el aislante:

$$Q_{aislante} = m_{aislante} * Cp_{aislante} * \frac{\Delta T}{t}$$

$$Q_{aislante} = 0,29Kg * 1200 \frac{J}{Kg - K} * \left( \frac{22K}{7200} \right) = 1,01 [W]$$

Energía total almacenada

$$Q_{almacenada} = Q_{acero} + Q_{aislante} = 16,2 [W]$$

#### 4.8 GANANCIA DE CALOR TOTAL TANQUE DE LECHE

Para el cálculo del calor total del tanque de refrigeración, se suman el calor a rechazar de la leche y el calor ganado mediante transferencia de calor desde el ambiente a la leche, a través de las superficies exteriores del tanque.

$$Q_{total;tl} = Q_{leche} + Q_{amb} + Q_{servicio} + Q_{almacenada}$$

$$Q_{total;tl} = 312,5 [W]$$

#### 4.9 RESUMEN CALCULOS TÉRMICOS TANQUE DE YOGURT

El diseño mecánico y térmico de los dos tanques es similar. El detalle de los cálculos para el tanque de capacidad de producto de 20 litros el cual será destinado para dispensar yogurt, se puede ver en (ANEXO B).

En la tabla 5, se resumen las características principales de los dos tanques de almacenamiento.

Tabla 5. Resumen cálculos térmicos tanque de leche y yogurt.

	TANQUE DE LECHE	TANQUE DE YOGURT
Volumen	0,060 [m <sup>3</sup> ]	0,020 [m <sup>3</sup> ]
Volumen de diseño	0,070 [m <sup>3</sup> ]	0,024 [m <sup>3</sup> ]
Diámetro	0,45 [m]	0,31 [m]
Altura	0,45 [m]	0,31 [m]
<b>Sistema de Agitación</b>		
L rodete	0,15 [m]	0,10 [m]
h rodete	0,15 [m]	0,10 [m]
w rodete	0,03 [m]	0,021 [m]
Diámetro eje agitador	0,0063 [m]	0,0063 [m]
# paletas	2	2
RPM motorreductor	25	25
<b>Carga Térmica</b>		
Masa	61,92 [Kg]	20,64 [Kg]
Carga del ambiente	24,49 [W]	14,41 [W]

Calor de servicio	2,45 [W]	1,44 [W]
Carga del producto	269,4 [W]	89,78 [W]
Energía almacenada	16,2 [W]	8,22 [W]
Carga térmica total	312,5 [W]	113,8 [W]

#### 4.10 CARGA TÉRMICA TOTAL

La carga térmica total es la suma de la obtenida para cada tanque, con la cual se seleccionará los dispositivos que conformarán el sistema de refrigeración, así como el diseño del evaporador el cual será el encargado de extraer la carga térmica.

$$\dot{Q}_{TOTAL} = 426,3 [W]$$

#### 4.11 SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

A continuación se describe el proceso de diseño y selección de los diferentes componentes del sistema:

- Unidad condensadora (compresor + condensador)
- Evaporador
- Tubo capilar
- Sistema de control

##### 4.11.1 Selección del refrigerante

La selección del refrigerante se hizo teniendo en cuenta el impacto ambiental y los daños que puede causar en la capa de ozono, también que sus características termodinámicas cumplan con nuestros requerimientos, por las anteriores razones se seleccionó el refrigerante 134a.

El R134a no es inflamable, es estable a las temperaturas de utilización. En cuanto a su toxicología es un producto químicamente inerte, no tóxico. (ANEXO D).

Figura 17. Datos técnico R134a.

Tipo Gas		R-134a
Nombre químico		1,1,1,2-Tetrafluoroetano
Fórmula química		CF <sub>3</sub> -CH <sub>2</sub> F
Número CAS		811-97-2
Masa molecular	Kg/kmol	102,0
Temperatura de ebullición a 1.013 bar	°C	-26,3
Punto de fusión a 1.013 bar	°C	-101
Temperatura crítica	°C	101,1
Presión crítica	bar	40,6
Densidad del líquido a -15°C	g/cm <sup>3</sup>	1,343
Densidad del líquido a 30°C	g/cm <sup>3</sup>	1,188
Calor latente de evaporación a -15°C	kJ/kg	206,8
Calor específico del líquido saturado a 30°C	kJ/kgK	1,440
Calor específico del vapor saturado a 30°C	kJ/kgK	1,104
Ratio de calor específico 1.013 bar y a 30°C	(cp/cv)	1,115
Inflamabilidad		no inflamable

Fuente. Salvador Escoda S.A.

#### 4.11.2 Temperatura de evaporación y condensación del refrigerante

En el apartado del cálculo del coeficiente bifásico del refrigerante R134a, se especifica en detalle la selección tanto de la temperatura de evaporación y de condensación a las cuales trabajara el sistema de refrigeración.

$$T_{evap} = -10 [^{\circ}C]$$

$$T_{cond} = 45 [^{\circ}C]$$

#### 4.11.3 Compresor

El compresor es el encargado de bombear refrigerante hacia el evaporador en la cantidad adecuada para que la instalación proporcione la potencia frigorífica deseada; pero, previamente, el condensador debe licuar el refrigerante que recibe

del compresor en estado de vapor a alta presión, pues así podrá llegar a la válvula de expansión e inundar el evaporador.

Figura 18. Compresor Embraco, ref 1/3 HP.



Fuente. <http://www.embraco.com/catalog/Default.aspx?&language=ES>

Se selecciona el compresor con la capacidad frigorífica que pueda extraer la carga térmica calculada, teniendo en cuenta la temperatura de evaporación del refrigerante y la temperatura de condensación.

Figura 19. Selección compresor Embraco.

<b>embraco</b>			<b>DATOS TÉCNICOS DEL COMPRESOR</b>							
<b>D - PERFORMANCE - DATOS CHECK POINT</b>										
CONDICIONES DE PRUEBA: @115V60Hz		ASHRAELBP32 Estática			Temperatura de evaporación (Temp. de condensación		-23.3°C (-9.94°F) 54.4°C (129.92°F))			
Capacidad de refrigeración +/- 5%			Consumo de potencia +/- 5%	Consumo de corriente +/- 5%	Flujo de masa +/- 5%	RANGO DE EFICIENCIA +/- 7%				
[Btu/h]	[kcal/h]	[W]	[W]	[A]	[kg/h]	[Btu/Wh]	[kcal/Wh]	[W/W]		
985	248	289	197	2.66	5.60	5.00	1.26	1.47		
<b>E - PERFORMANCE - CURVAS</b>										
CONDICIONES DE PRUEBA: @115V60Hz		ASHRAE32 Estática			(Temp. de condensación 45°C (+113°F))					
Temperatura de evaporación	Capacidad de refrigeración +/- 5%			Consumo de potencia +/- 5%	Consumo de corriente +/- 5%	Flujo de masa +/- 5%	RANGO DE EFICIENCIA +/- 7%			
°C (°F)	[Btu/h]	[kcal/h]	[W]	[W]	[A]	[kg/h]	[Btu/Wh]	[kcal/Wh]	[W/W]	
-35 (-31)	539	136	158	126	2.35	3.05	4.27	1.08	1.25	
-30 (-22)	748	188	219	163	2.48	4.24	4.61	1.16	1.35	
-25 (-13)	993	250	291	192	2.61	5.64	5.19	1.31	1.52	
-20 (- 4)	1283	323	376	216	2.75	7.30	5.95	1.50	1.74	
-15 (+ 5)	1630	411	478	238	2.91	9.31	6.83	1.72	2.00	
-10 (+14)	2044	515	599	262	3.07	11.71	7.77	1.96	2.28	
-5 (+23)	2535	639	743	291	3.25	14.58	8.70	2.19	2.55	

Fuente. <http://www.embraco.com/catalog/Default.aspx?&language=ES>

Tabla 6. Especificaciones técnicas compresor Embraco ref 1/3 HP.

<b>Especificaciones técnicas</b>	
Marca	Embraco
Modelo	FFU100HAK
Tensión nominal	115-127 V 60 Hz
Refrigerante	R-134 <sup>a</sup>
Aplicación	L-MBP
Desplazamiento	7.95 cm <sup>3</sup>
Torque de arranque	Bajo
Tipo de aceite	ESTER/ISO10
Corriente a plena carga	4,10 A

#### 4.11.4 Condensador

Posee la función de liberar el calor absorbido por el evaporador y por el proceso de compresión para el medio ambiente.

En este proceso el fluido refrigerante proveniente del compresor está a alta presión y alta temperatura. Durante el recorrido del fluido refrigerante por el condensador, ocurre la transformación del estado físico del fluido refrigerante de vapor sobresaturado para líquido, subenfriado, a alta presión.

El condensador igualmente tendrá la capacidad de evacuar la carga térmica de los 426,3 [W].

Tabla 7. Especificaciones técnicas condensador Embraco.

<b>Especificaciones técnicas</b>	
Marca	Embraco
Modelo-Code	UC UFU 100HAK- 215332003

Número de filas de tubos	2x16
Refrigerante	R-134 <sup>a</sup>
Aplicación	L-MBP
Caudal de aire	420 (m <sup>3</sup> /h)

#### 4.11.5 Tubo capilar

El tubo capilar une el condensador con el evaporador (alta y baja presión), y es un tubo de cobre de pequeño diámetro. El fluido refrigerante al circular por el interior del tubo, sufre una caída de presión y por tanto de temperatura, lo que origina su expansión.

Para la selección del tubo capilar se usó un programa de Danfoss, donde se parametriza con el tipo de refrigerante, la carga térmica total, la temperatura de evaporación y la temperatura de condensación.

Figura 20. Programa selección tubo capilar.

The screenshot shows the DanCap software interface. On the left is a schematic diagram of a refrigeration system with a compressor, condenser, evaporator, and capillary tube. Points A, B, C, and D are marked on the diagram. On the right, the 'Input Data' section shows the following values:

- Refrigerant: R134a
- Heat load of the system: 426 W
- Evaporating temperature: -10 °C
- Condensing temperature: 45 °C
- Return gas temperature: 20 °C

The 'Capillary Tube Recommendation' section shows a table with the following data:

Length	Inner Diameter
0.36 m	0.91 mm
0.78 m	1.07 mm
0.99 m	1.12 mm
1.69 m	1.24 mm
<b>1.87 m</b>	<b>1.27 mm</b>
2.75 m	1.37 mm
3.01 m	1.40 mm
4.28 m	1.50 mm
6.43 m	1.63 mm

The optimal selection (1.87 m length and 1.27 mm inner diameter) is highlighted in green. Below the table, it states: 'Optimal selection is highlighted in green.'

At the bottom of the interface, there are buttons for 'Help', 'Print', and 'Settings'. The homepage URL 'compressors.danfoss.com' is visible at the bottom left.

Fuente. <http://www.danfoss.com>

Las dimensiones del tubo capilar recomendado:

$$L_{capilar} = 1,87 [m]$$

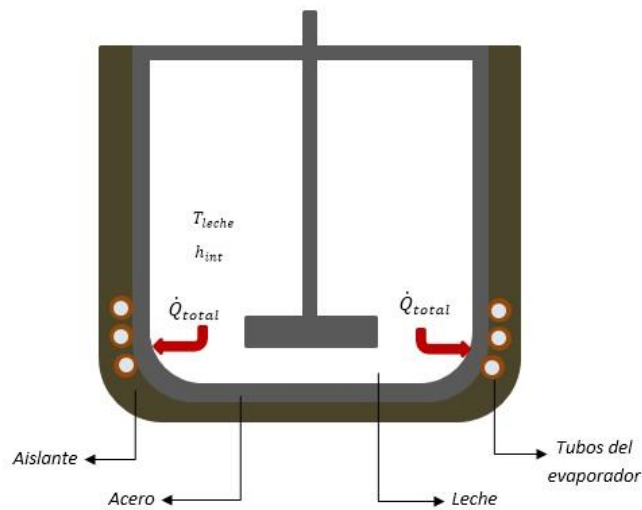
$$D_{interior} = 1,27 [mm]$$

#### 4.11.6 Evaporador

El evaporador consta de un tubo liso y se diseña determinando la longitud de serpentín necesaria para extraer la carga térmica del sistema hacia el refrigerante.

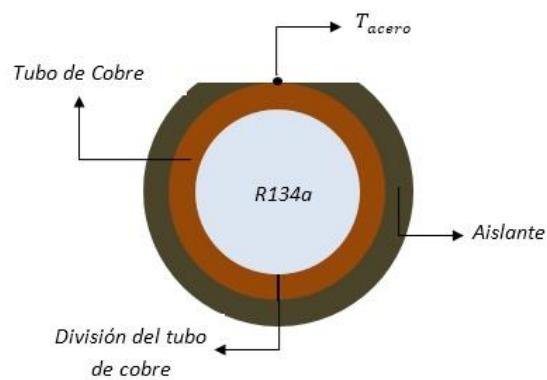
Para el diseño del evaporador se tendrá en cuenta la transferencia de calor por conducción desde el tanque de almacenamiento hacia los tubos del evaporador, esta conducción de calor se representa como una aleta con punta aislada.

Figura 21. Disposición de los tubos del evaporador en los tanques de almacenamiento.



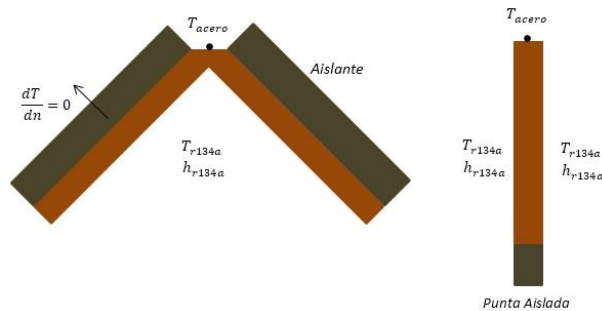
Para el análisis de conducción de calor en los tubos de cobre del evaporador se considerará que la superficie de los tubos estará perfectamente aislada.

Figura 22. Tubo del evaporador aislado.



Para modelar el tubo de cobre como una aleta se parte el tubo de tal forma que quede como una aleta rectangular recta, y unimos las dos partes por el lado aislado quedando la punta de la aleta aislada, y la superficie de contacto del cobre en contacto con el flujo refrigerante.

Figura 23. Tubo de cobre modelado como una aleta recta de punta aislada.



La tubería de cobre del evaporador es de 3/8 pulgada de diámetro, donde:

$$D_{ext} = 0,009525 [m]$$

$$D_{int} = 0,007899 [m]$$

#### 4.11.7 Coeficiente de transferencia de calor bifásico del refrigerante R134a

El coeficiente de transferencia de calor por convección en el evaporador se calcula por medio de la ley de enfriamiento de Newton<sup>28</sup>.

$$q'' = h_{R134a} * (T_s - T_{R134a})$$

Dónde:

<sup>28</sup> CENGEL, Yunus A. Transferencia de calor y masa, un enfoque práctico. 3 ed. México D.F: McGraw-Hill/ Interamericana Editores, S.A, 2007. p. 27.

$q''$ , Flujo de calor por convección por unidad de área entre el refrigerante y el serpentín  $\left(\frac{Kw}{m^2}\right)$ .

$h_{R134a}$ , Coeficiente de transferencia de calor por convección en el evaporador  $\left(\frac{Kw}{m^2 * k}\right)$ .

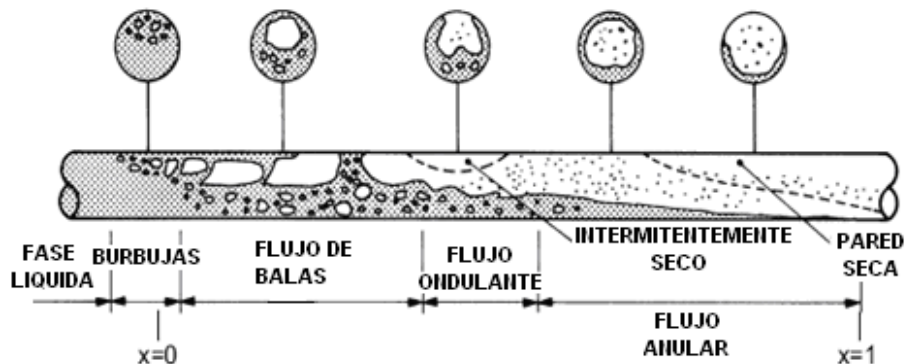
$T_s$ , Temperatura superficial en las paredes del serpentín (K).

$T_{R134a}$ , Temperatura del refrigerante en el evaporador (K).

Inicialmente se asume un valor de flujo de calor por convección ( $q''$ ), el cual se determinará por medio iterativo una vez calculado el coeficiente de transferencia de calor ( $h_{R134a}$ ).

Para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección, se analizó al refrigerante como un flujo bifásico, ya que conforme circula por el serpentín sufre un cambio de fase. El cálculo requiere un análisis promedio de las propiedades del refrigerante en la mezcla liquido-vapor.

Figura 24. Regímenes diferentes de flujo que se encuentran en la ebullición en un tubo con convección forzada.



Fuente. MIRANDA I, Rubén. Trabajo de grado (Ingeniero mecánico). 2008. p. 6.

El flujo másico de refrigerante se determina como la relación entre el calor total que se requiere retirar del sistema y la entalpia de vaporización<sup>29</sup> ( $h_{fg}$ ).

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{h_{lg}}$$

Donde:

$\dot{m}$ , Rapidez de la evaporización del refrigerante ( $\frac{Kg}{s}$ ).

$h_{lg}$ , Calor latente de vaporización ( $\frac{Kj}{Kg}$ ).

$\dot{Q}$ , Calor a retirar del sistema ( $Kw$ )

Donde el calor latente de vaporización se define como la diferencia de la entalpía del refrigerante a la salida y la entrada del evaporador.

$$h_{lg} = h_g - h_l$$

La entalpía a la salida del evaporador se determinó por medio de la temperatura de vaporación, definida como la temperatura a la que se evapora el refrigerante dentro del serpentín, la cual es constante.

La temperatura del refrigerante en un condensador enfriado por aire, está entre 17 y 19°C más caliente que la temperatura ambiente<sup>30</sup>.

$$T_{cond} = T_{ext} + 18 \text{ } ^\circ\text{C} = 44 \text{ } ^\circ\text{C} = 317 \text{ } K$$

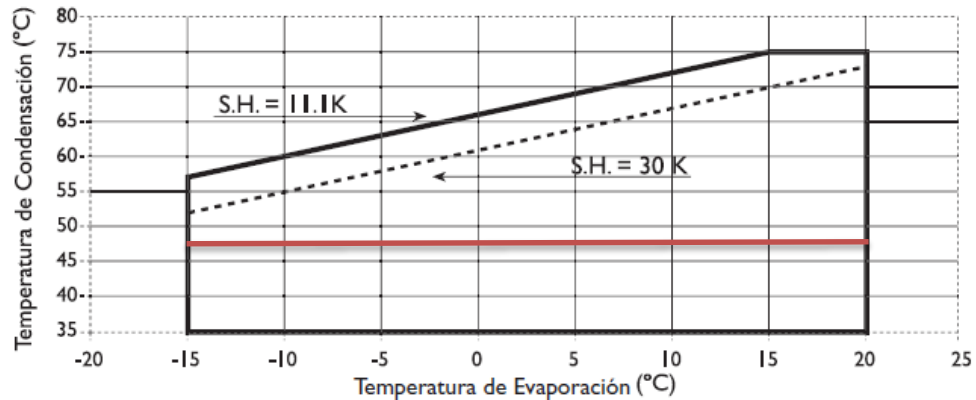
---

<sup>29</sup> CENGEL, Yunus A. Transferencia de calor y masa, un enfoque práctico. 3 ed. México D.F: McGraw-Hill/ Interamericana Editores, S.A, 2007. p. 622.

<sup>30</sup> EMERSON, climate technologies. Manual técnico de refrigeración y aire acondicionado. 2013, p. 144.

La temperatura de evaporación se tomará de catálogos de equipos de refrigeración, donde asumiremos un valor en función de la temperatura de condensación dentro del rango admisible.

Figura 25. Rango de temperaturas de vaporación del R134a.



Fuente. DANFOSS. Manual de operación y mantenimiento de la unidad condensadora. 2013. p.8.

La temperatura de vaporación es entre 8 a 10 °C más fría que la temperatura a la cual se desea alcanzar en el sistema<sup>31</sup>, sin embargo en nuestro caso por conveniencia se asumió una temperatura de vaporación de -10°C.

$$T_{R134a} = -10 \text{ } ^\circ\text{C} = 263 \text{ K}$$

Se calcula las entalpias a la entrada y salida del evaporador mediante EES. A la temperatura de vaporización y de condensación, y la calidad en cada punto del proceso.

$$h_g = 244.6 \left( \frac{\text{Kj}}{\text{Kg}} \right)$$

<sup>31</sup> DANFOSS, aplicación. Tanques de refrigeración de leche. Módulo 1, 2014.

$$h_l = 112.8 \left( \frac{Kj}{Kg} \right)$$

De lo anterior:

$$h_{lg} = 131.8 \left( \frac{Kj}{Kg} \right)$$

También:

$$\dot{m} = \frac{0.426 (Kw)}{131.8 \left( \frac{Kj}{Kg} \right)} = 0.00323 \left( \frac{Kg}{s} \right)$$

Tabla 8. Propiedades del refrigerante R134a a -10°C.

Constantes del refrigerante R134a	Símbolo	Unidades	Valor
Viscosidad dinámica estado líquido	$\mu_{liq}$	$\left( \frac{Kg}{m * s} \right)$	0,000315
Viscosidad dinámica estado vapor	$\mu_{vap}$	$\left( \frac{Kg}{m * s} \right)$	0,000005982
Densidad de masa en estado líquido	$\rho_{liq}$	$\left( \frac{Kg}{m^3} \right)$	1327
Densidad de masa en estado vapor	$\rho_{vap}$	$\left( \frac{Kg}{m^3} \right)$	10,04
Conductividad térmica en estado líquido	$Kt_{r134a}$	$\left( \frac{Kw}{m * K} \right)$	0,0000989

Fuente. CENGEL, Yunus A. Transferencia de calor y masa. Tercera edición.

El cálculo del coeficiente de transferencia de calor bifásico se analizó por medio del modelo de Kandlikar, donde establece la suma de dos regiones completamente diferenciadas dependiendo del valor del número convectivo (Co).

El número convectivo  $Co$  es un parámetro que ayuda a identificar cual es la zona dominante dentro del serpentín, ya sea ebullición convectiva si  $Co < 0.65$  o ebullición nucleada<sup>32</sup> si  $Co > 0.65$ .

$$Co = \left( \frac{1-x}{x} \right)^{0.8} * \left( \frac{\rho_{vap}}{\rho_{liq}} \right)^{0.5}$$

Dónde:

$Co$ , Número de convección (adimensional).

$x$ , calidad de vapor (adimensional).

$\rho_{vap}$ , Densidad de masa del refrigerante en fase de vapor  $\left( \frac{Kg}{m^3} \right)$ .

$\rho_{liq}$ , Densidad de masa del refrigerante en fase de líquido  $\left( \frac{Kg}{m^3} \right)$ .

Las correlaciones dadas por el modelo de Kandlikar para determinar el coeficiente de transferencia de calor bifásico<sup>33</sup>:

$$h_{R134a} = 667.2 * B_o^{0.7} * (1-x)^{0.8} * F_{fl} * h_f + 1.136 \left( \frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{0.45} * x^{0.72} * (1-x)^{0.08} * f_2 * h_f$$

Dónde:

$h_f$ , Coeficiente de transferencia en fase líquida  $\left( \frac{Kw}{m^2 * k} \right)$ .

$x$ , Calidad de vapor (adimensional).

$F_{fl}$ , Fluido específico del refrigerante R134a (adimensional).

---

<sup>32</sup> ASHRAE handbook, fundamentals, 2009, p. 5.6.

<sup>33</sup> *Ibid.*, p. 5.6.

$B_o$ , Número de ebullición (adimensional).

$\rho_l$ , Densidad del refrigerante en fase líquida  $\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$ .

$\rho_v$ , Densidad del refrigerante en fase vapor  $\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$ .

$f_2$ , Constante (adimensional)

Se seleccionó una tubería de 3/8 de pulgada en diámetro para el diseño del serpentín.

$$D_{ext} = 0.009525[m]$$

$$D_{int} = 0.007899 [m]$$

Numero de Reynolds

$$Re = \frac{4 * \dot{m}}{\pi * D_{int} * \mu_{liq}}$$

Dónde:

$Re$ , Número de Reynolds (adimensional).

$\dot{m}$ , Flujo másico de refrigerante  $\left(\frac{Kg}{s}\right)$ .

$\mu_{liq}$ , Viscosidad dinámica en fase líquida del refrigerante  $\left(\frac{Kg}{m*s}\right)$ .

$$Re = \frac{4 * 0.00323 \left(\frac{Kg}{s}\right)}{\pi * 0.007899[m] * 0.0003150 \left(\frac{Kg}{m * s}\right)}$$

$$Re = 1654$$

$Re < 2300$  El flujo en el tubo es laminar.

Numero de Nusselt para flujo laminar

$$Nu_{R134a} = \frac{h_f * D_{int}}{Kt_{R134a}} = 3.66$$

Dónde:

$Nu_{R134a}$ , Número de nusselt del refrigerante en estado líquido (adimensional).

$h_f$ , Coeficiente de transferencia del refrigerante en fase líquida  $\left(\frac{Kw}{m^2 * k}\right)$ .

$Kt_{R134a}$ , Conductividad térmica del refrigerante en fase líquida  $\left(\frac{Kw}{m * k}\right)$ .

Una vez calculados los parámetros necesarios, se determinó el coeficiente de transferencia de calor en fase líquida.

$$h_f = \frac{3.66 * 0.0000989 \left(\frac{Kw}{m * k}\right)}{0.007899 [m]}$$

$$h_f = 0.04583 \left(\frac{Kw}{m^2 * k}\right)$$

El número de ebullición se obtuvo de la siguiente ecuación<sup>34</sup>:

$$Bo = \frac{q''}{G_m * h_{lg}}$$

Dónde:

$q''$ , Flujo de calor por unidad de área entre el serpentín y el refrigerante  $\left(\frac{Kw}{m^2}\right)$ .

$G_m$ , Velocidad másica  $\left(\frac{Kw}{m^2 * s}\right)$ .

---

<sup>34</sup> ASHRAE handbook, fundamentals, 2009, p. 5.6.

$h_{lg}$ , Entalpia de vaporización  $\left(\frac{KJ}{Kg}\right)$ .

La velocidad másica se define como la relación entre el flujo másico de refrigerante por el tubo y el área transversal. Su ecuación es<sup>35</sup>:

$$G_m = \frac{\dot{m}}{A_{trans}}$$

Donde:

$\dot{m}$ , Flujo másico de refrigerante  $\left(\frac{Kg}{s}\right)$ .

$A_{trans}$ , Área transversal del serpentín  $[m^2]$ .

$$A_{trans} = \frac{\pi * 0.007899^2}{4}$$

$$A_{trans} = 0.000049[m^2]$$

Reemplazando

$$G_m = \frac{0.00323 \left(\frac{Kg}{s}\right)}{0.000049[m^2]}$$

$$G_m = 65,96 \left(\frac{Kg}{m^2 * s}\right)$$

Para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor bifásico, se requiere conocer el número de Froude<sup>36</sup>.

---

<sup>35</sup> *Ibid.*, p. 5.5.

<sup>36</sup> *Ibid.*, p. 5.6.

$$Fr = \frac{G_m^2}{\rho_l^2 * g * D_{int}}$$

Donde:

$Fr$ , Numero de Froude (adimensional)

$g$ , Gravedad  $\left(\frac{m}{s^2}\right)$

$$Fr = \frac{65.96 \left(\frac{Kg}{m^2 * s}\right)^2}{1327 \left(\frac{Kg}{m^3}\right)^2 * 9.81 \left(\frac{m}{s^2}\right) * 0.007899[m]}$$

$$Fr = 0.03188$$

Para  $Fr < 0.04$

$$f_2 = (25 * Fr)^{0.3}$$

$$f_2 = 0.9342$$

La constante del fluido específico para el refrigerante<sup>37</sup> (R134a) es igual a:

$$F_{fl} = 1.63$$

---

<sup>37</sup> ASHRAE handbook, fundamentals, 2009, p. 5.6.

Figura 26. Valores  $F_{fl}$  fluido específico.

Fluid-specific  $F_{fl}$  values are as follows (commercial copper tubes unless otherwise specified):

Water	1.00
R-11	1.30
R-12	1.50
R-13B1	1.31
R-22	2.20
R-113	1.30
R-114	1.24
R-134a	1.63
R-152a	1.10
R-32/R-132 (60 to 40% wt.)	3.30
Kerosene	0.488
All fluids with stainless steel	1.0

Fuente. ASHRAE handbook, fundamentals, 2009, p. 5.6.

La temperatura superficial del evaporador es aproximadamente de 4 a 7 °C mayor a la temperatura del refrigerante<sup>38</sup>.

$$T_s = T_{R134a} + 7\text{ }^\circ\text{C} = -3\text{ }^\circ\text{C} = 270\text{ K}$$

Para determinar el coeficiente bifásico se realizó una parametrización del número convectivo anteriormente definido  $Co$ , el cual es función de la calidad del refrigerante en el interior del tubo del serpentín. La variación de la calidad ( $X$ ) se tomó desde 0,1 a 0,9. Resolviendo mediante EES, los resultados se pueden observar en la tabla 9.

<sup>38</sup> EMERSON, climate technologies. Manual técnico de refrigeración y aire acondicionado. 2013, p. 144.

Tabla 9. Coeficiente bifásico en función de la calidad del refrigerante.

Calidad (X)	Numero convectivo (Co)	Coeficiente bifásico (hR134a)
0,1	0,5045	176,9
0,2	0,2637	239,3
0,3	0,1713	286,2
0,4	0,1203	314,4
0,5	0,08698	337,7
0,6	0,06289	362
0,7	0,04416	363
0,8	0,02869	364,1
0,9	0,015	352,3

El mayor valor para el coeficiente de transferencia de calor bifásico del refrigerante se obtiene en una calidad de 0,8. En nuestro caso para ser conservativos utilizamos una calidad para el diseño de 0,6, y el numero convectivo es menor que 0,65, lo que indica que la zona dominante es por ebullición convectiva.

Se iteró hasta igualar el flujo de calor asumido para determinar el número de evaporación y el calculado por medio de la ecuación de enfriamiento de Newton, dando como resultado final con un error de 0.002478%:

Flujo de calor del evaporador al refrigerante:

$$q'' = 2.534 \left( \frac{Kw}{m^2} \right)$$

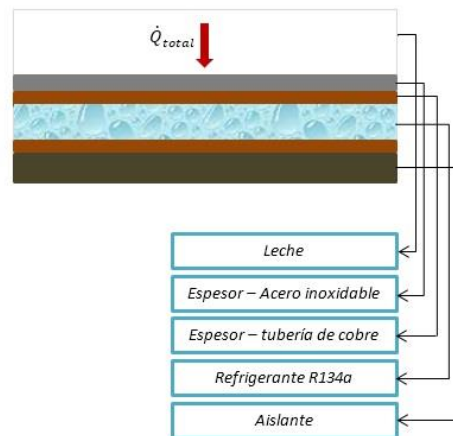
Coeficiente de transferencia de calor bifásico del refrigerante:

$$h_{R134a} = 362 \left( \frac{W}{m^2 * k} \right)$$

#### 4.11.8 Cálculo de la longitud del evaporador

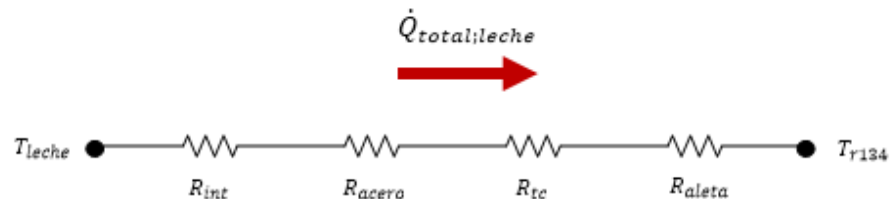
Teniendo en cuenta que la carga térmica total del sistema de cada tanque será extraída por la longitud de serpentín correspondiente a cada tanque. Mediante las siguientes ecuaciones se calcula la longitud de serpentín necesaria para absorber la carga térmica respectiva, teniendo en cuenta que se realiza para el instante en el cual el producto se encuentra en su temperatura de conservación 4°C.

Figura 27. Proceso de transferencia de calor desde el interior del tanque hasta el refrigerante R134a.



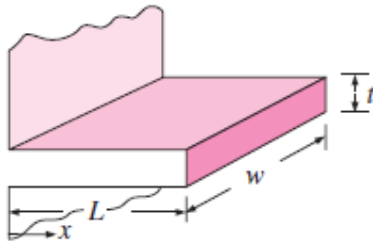
Se dibujan las resistencias térmicas del evaporador que se usarán para el cálculo de la longitud de tubo de cobre, el cual conformará el evaporador.

Figura 28. Resistencias térmicas del evaporador.



Para el análisis de transferencia de calor de la aleta, se siguen las siguientes ecuaciones<sup>39</sup>:

Figura 29. Aleta rectangular recta.



Fuente. CENGEL, Yunus. Transferencia de Calor y masa. p. 165.

Constante de la aleta.

$$m = \sqrt{\frac{2 * h_{R134a}}{K_{cobre} * t_{aleta}}}$$

Donde:

$h_{R134a}$ : Coeficiente convectivo del refrigerante

$K_{cobre}$ : Conductividad térmica de la tubería de cobre.

$t_{aleta}$ : Espesor de la tubería de cobre.

$$m = \sqrt{\frac{2 * 362}{404 * 0,001626}} = 33,2$$

Eficiencia de la aleta.

$$n_{aleta} = \frac{\tanh(m * L_c)}{m * L_c}$$

<sup>39</sup> CENGEL, Yunus A. Transferencia de calor y masa. Un enfoque práctico. 3 ed. México D.F. Mc Graw Hill. 2007. p. 165.

$L_c$ : Longitud corregida de la aleta

$$L_c = L = \pi * r_{cobre} = \pi * 0,00476 = 0,01495 [m]$$

La eficiencia de la aleta queda:

$$n_{aleta} = 0,9252$$

Resistencia térmica de la aleta

$$R_{aleta} = \frac{1}{n_{aleta} * h_{R134a} * 2 * w * L_c}$$

Resistencia de convección interna.

$$R_{int} = \frac{1}{h_{int} * A_b}$$

Donde:

$h_{int}$ : Coeficiente convectivo de la leche.

$A_b$ : Área de transferencia de calor

$$A_b = t_{aleta} * w$$

Resistencia de conducción del acero.

$$R_{acero} = \frac{e_{acero}}{K_{acero} * A_b}$$

$h_{int}$ : Coeficiente convectivo de la leche.

Resistencia térmica de contacto

$$R_{tc} = \frac{1}{h_{tc} * A_b}$$

Coeficiente de conductancia térmica de contacto entre metales<sup>40</sup>:

$$h_{tc} = 16400 \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$

Para el cálculo de la longitud total de tubo de cobre la cual conformara el evaporador, se ingresaran las siguientes ecuaciones donde se resolverá para (w: longitud de tubería de cobre) mediante EES (ANEXO C), esta longitud será la necesaria para extraer la carga térmica total impuesta por el sistema.

Sumatoria de resistencias.

$$R_{total} = R_{int} + R_{acero} + R_{tc} + R_{aletta}$$

Transferencia de calor desde la leche almacenada hacia el refrigerante.

$$Q_{total:leche} = \frac{T_{f;leche} - T_{R134a}}{R_{total}}$$

Donde:

$T_{f;leche}$ : Temperatura de conservación de la leche, 4°C.

$T_{R134a}$ : Temperatura de evaporación del refrigerante, -10°C.

La longitud total de tubería de cobre necesaria es:

$$w_{leche} = L_{cobre;leche} = 11,8 [m]$$

$$w_{yogurt} = L_{cobre;yogurt} = 4,7 [m]$$

$$w_{total} = L_{cobre;evap} = 16,5 [m]$$

---

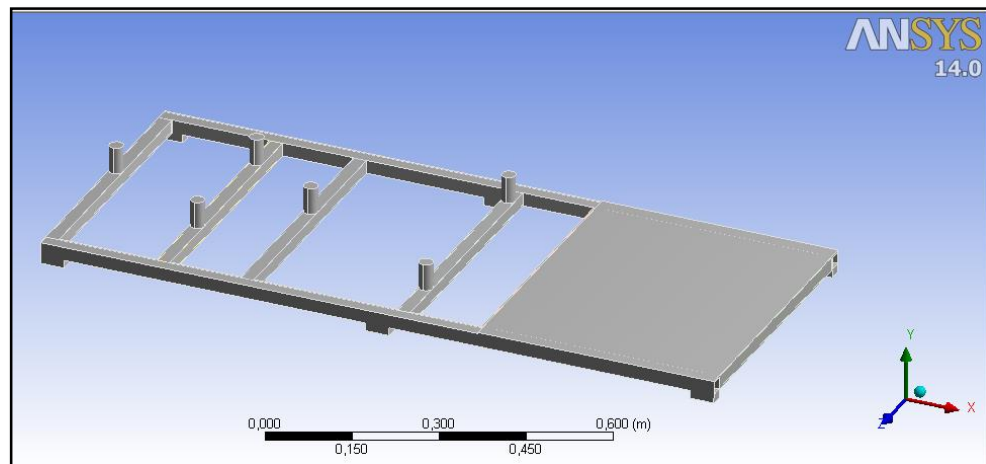
<sup>40</sup> *Ibid.*, p. 145.

## 5 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA

### 5.1 ANÁLISIS ESTRUCTURAL

En el diseño y dimensionamiento del soporte del sistema completo se adoptó la siguiente geometría:

Figura 30. Base estructural del sistema completo.



Buscando la mayor resistencia de la estructura se realizó la mejor distribución de los tanques de almacenamiento así como la unidad condensadora, entre otros. El material utilizado fue tubo de acero estructural cuadrado galvanizado (ASTM A36) de 25x25x1.5 mm, La validación de la resistencia de la estructura se hizo mediante el software ANSYS, analizando los esfuerzos máximos de Von Mises, las deformaciones y determinando el factor de seguridad, ante las cargas impuestas por los tanques y la unidad condensadora.

#### **Fuerzas aplicadas a la estructura base**

Conociendo la masa total de cada tanque y de la unidad condensadora se puede determinar la fuerza total ejercida y distribuirla en cada lugar especificado de la estructura.

Tabla 10. Sumatoria de pesos de los componentes sobre el soporte base.

COMPONENTE	MASA [Kg]	TOTAL [Kg]
Tanque de Leche	10,42	76,34
Masa de leche	61,92	
Motorreductor	3	
bomba, aislante	1	
Tanque de Yogurt	5,304	29,944
Masa de Yogurt	20,64	
Motorreductor	3	
bomba aislante	1	
Unidad condensadora	26	26
	<b>TOTAL</b>	<b>132,28</b>

- Fuerza aplicada por el tanque de leche

$$F1 = m_1 * g$$

$$F1 = 76.34 [kg] * 9,81 \left[ \frac{m}{s^2} \right] = 748,8954 [N]$$

Esta fuerza se divide entre las tres patas soportes del tanque.

- Fuerza aplicada por el tanque de yogurt

$$F2 = m_2 * g$$

$$F2 = 29,944[kg] * 9,81 \left[ \frac{m}{s^2} \right] = 293,75 [N]$$

Esta fuerza se divide entre las tres patas soporte del tanque.

- Fuerza aplicada por la unidad condensadora

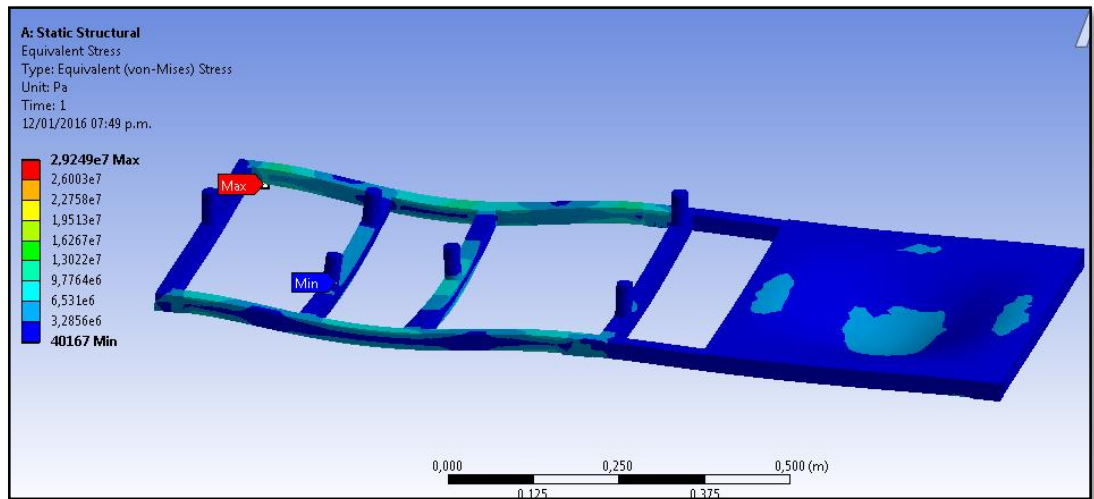
$$F3 = m_3 * g$$

$$F3 = 26[kg] * 9,81 \left[ \frac{m}{s^2} \right] = 255,06 [N]$$

Esta fuerza se distribuye en la base hecha para soportar la unidad.

Por medio del software ANSYS se analizó la estructura mediante el método de elementos finitos, obteniendo como resultado los siguientes valores tal y como indica la figura 31.

Figura 31. Análisis de esfuerzos en la estructura base.



Dando un esfuerzo máximo equivalente de Von Mises de 2,9249E7 [Pa].

Utilizando el software también podemos calcular el factor de seguridad o simplemente aplicando el criterio de la energía de distorsión se obtiene.

$$\eta_s = \frac{S_y}{\sigma}$$

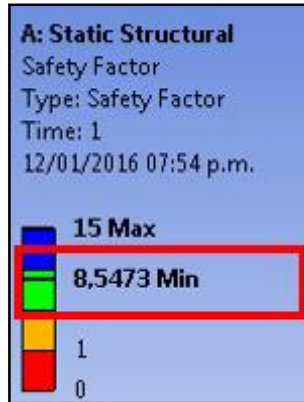
Dónde:

$S_y$ , Resistencia de fluencia.

$\sigma$ , Esfuerzo de Von Mises

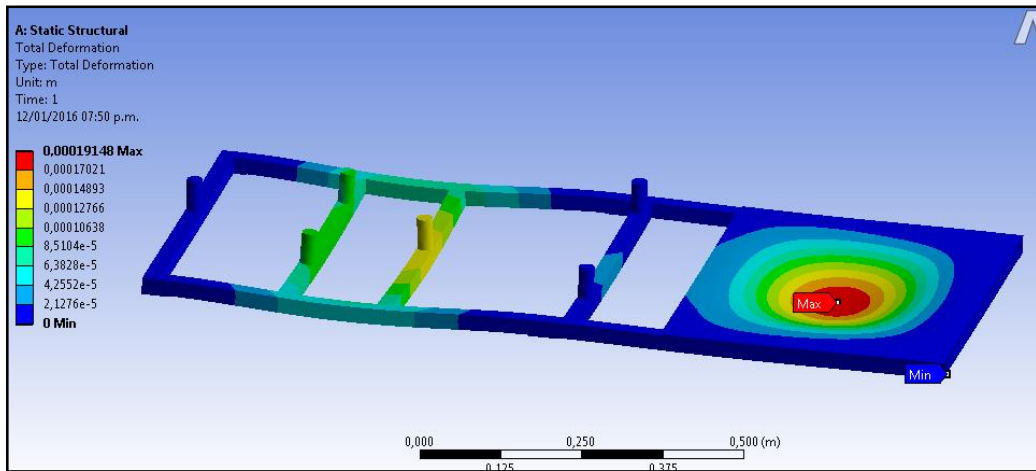
$$\eta_s = \frac{2,50E8 \text{ pa}}{2,9249E7 \text{ pa}} = 8.54$$

Figura 32. Factor de seguridad de la estructura base.



También se analizaron las deformaciones de la estructura en sus puntos críticos dando los siguientes resultados:

Figura 33. Análisis de deformación de la estructura base.



Dando como valor de deformación máxima  $X_{def} = 0,19148 \text{ mm}$ .

Los resultados garantizan que la estructura puede resistir todos los elementos del sistema sin sufrir grandes esfuerzos ni deformaciones, lo cual indica que tanto el material como la geometría de la estructura son adecuados.

## **6 SISTEMA DE CONTROL ELECTRÓNICO**

### **6.1 FUNCION Y COMPONENTES DEL SISTEMA DE CONTROL**

El sistema de control se realizó en base al microcontrolador ATMEGA 32U4, donde se diseñó la placa PCB de circuito impreso, la cual controlará los dispositivos de accionamiento como el sistema de agitación, el sistema de bombeo y la interfaz de comunicación con el usuario.

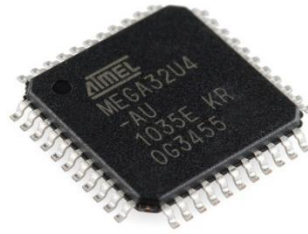
Los componentes principales que hacen parte del control son:

- Microcontrolador ATmega32U4
- Fuente de 12V
- Relé electromecánico 12V
- Pantalla LCD
- Teclado
- Pulsadores electrónicos
- Billetero electrónico BV20
- Monedero electrónico multimoneda YD-M715

#### **6.1.1 Microcontrolador ATMEGA 32U4**

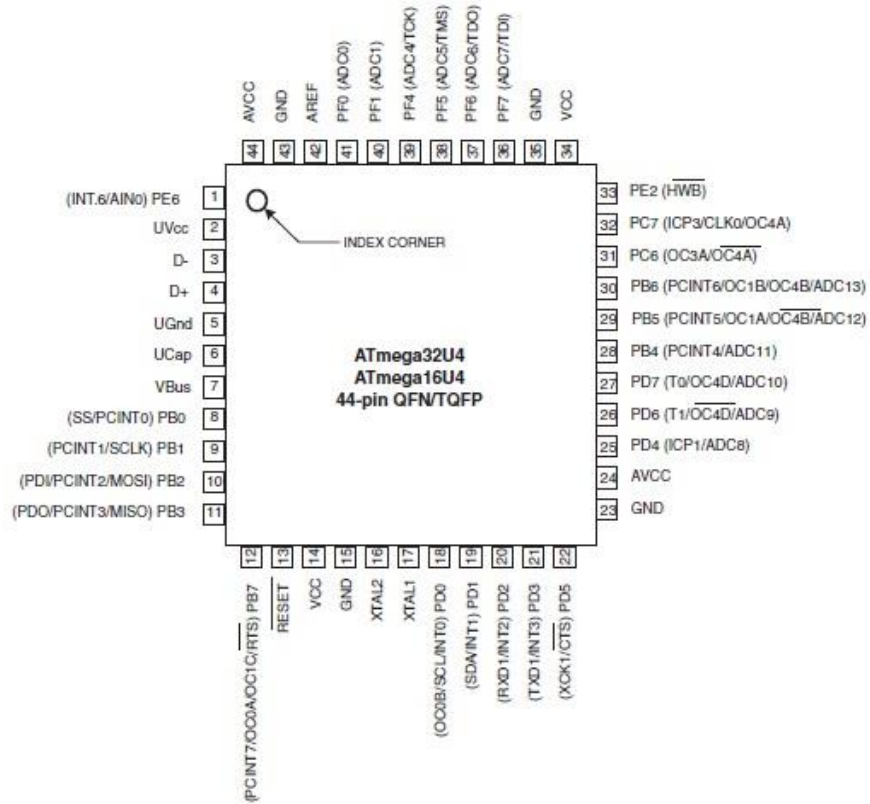
Es un microcontrolador CMOS de 8 bits de alto rendimiento, bajo consumo de potencia basado en la arquitectura AVR RISC mejorada. El ATmega32U4 ejecuta potentes instrucciones en un solo ciclo de reloj, llegando a un desempeño cercano a 1 MIPS por MHz, lo que permite optimizar el consumo de potencia contra la velocidad de procesamiento. Cuenta con 16/32K bytes de sistema flash programable, 512Bytes/1K bytes EEPROM, velocidad 16MHz, alimentación de voltaje 2.7 ~ 5.5V, temperatura de operación -40 ~ 85°C.

Figura 34. Microcontrolador Atmega 32U4.



Fuente. <http://www.atmel.com/devices/atmega32u4.aspx>

Figura 35. Configuración de pines ATmega32U4.



Fuente. [http://www.atmel.com/Images/Atmel-7766-8-bit-AVR-ATmega16U4-32U4\\_Datasheet.pdf](http://www.atmel.com/Images/Atmel-7766-8-bit-AVR-ATmega16U4-32U4_Datasheet.pdf)

### 6.1.2 Fuente de 12 voltios

Se instala este tipo de fuente para la alimentación de las bombas, y mediante un regulador de voltaje proporciona la tensión de operación de 5V de la tarjeta BOLT microcontroladora y de las placas de circuitos auxiliares integrados a la tarjeta.

Figura 36. Fuente 12 voltios.



Fuente. <http://www.tectronix.cl/fuente-switching-12v-10a.html>

### 6.1.3 Pantalla LCD

Display LCD de 16 caracteres y un solo renglón. La tensión de operación es a 5V. La pantalla está conectada a la placa de control, donde se visualizará el detalle de los productos ofrecidos como también las cantidades que puede dispensar. Además puede mostrar cualquier error de conexión de los elementos electrónicos, con el fin de proceder a corregirlos.

Figura 37. Pantalla LCD 16x1.

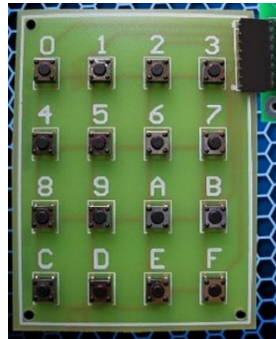


Fuente. [http://www.puntofotante.net/PROY\\_LCD.htm](http://www.puntofotante.net/PROY_LCD.htm)

#### 6.1.4 Teclado

Se instala una placa con pulsadores electrónicos el cual permitirá una fácil configuración de los precios cuando se deseé, accediendo mediante una determinada clave exclusiva del propietario.

Figura 38. Teclado

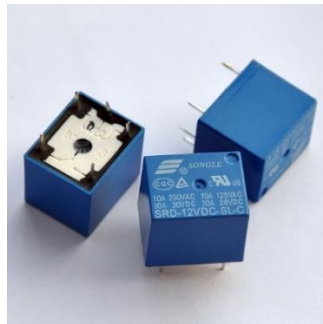


Fuente. <http://www.puntofotante.net/EDUKEY.htm>

#### 6.1.5 Relé electromecánico 12 voltios

Este dispositivo permitirá accionar las bombas para dispensar la cantidad de producto solicitada, de igual modo accionan los motores de los tanques de leche y yogurt para llevar a cabo la agitación durante un tiempo de determinado.

Figura 39. Relé electromecánico 12 voltios



Fuente. <https://www.planetaelectronico.com/rele-3v-dc-10a-1c-p-17656.html>

### 6.1.6 Botones electrónicos

Esos botones permitirán la interfaz de selección y de la cantidad de producto solicitada por el cliente. Se conectarán a la fuente de 12v.

Figura 40. Botón electrónico.



Fuente. [http://www.dannsof.com/index.php?route=product/product&path=81\\_85&product\\_id=81](http://www.dannsof.com/index.php?route=product/product&path=81_85&product_id=81)

## 6.2 SISTEMA DE PAGO ELECTRÓNICO

El sistema de pago estará conformado por un aceptador de billetes y un receptor de monedas. El protocolo de funcionamiento de los dispositivos de cobro es de pulsos, funcionan emitiendo una cantidad de pulsos específica según el valor del billete o de la moneda aceptada.

### 6.2.1 Billetero electrónico BV20

El sistema BV20 es un dispositivo validador de billetes compacto, perfecto para la mayoría de las maquinas comerciales. Programado de fábrica para funcionar mediante el protocolo de pulsos. En modo pulsos emite una serie de pulsos en el pin Vend 1, (ver ANEXO F). Acepta los billetes de toda denominación \$1.000-\$50.000 tanto nuevos como antiguos.

- Tensión de operación 12V (+/-10%)
- Temperatura 3~50°C, humedad 5~95% sin condensación

- Peso 300 g
- Aceptación de billetes ~ 2 segundos
- Dimensiones: 11x9.8x5.8 cm

Figura 41. Billetero electrónico BV20.



Fuente. <http://innovative-technology.com/es/products/products-main/128-bv20>

### 6.2.2 Monedero electrónico multimoneda YD-M715

Es un receptor de monedas inteligente que funciona mediante el protocolo de pulsos, emitiendo determinados pulsos de acuerdo a la moneda ingresada, donde emite 1 pulso para la moneda de \$100, 2 pulsos para la moneda de \$200, y así sucesivamente, con capacidad de aceptar monedas de \$100-\$1.0000, antiguas y nuevas.

- La tensión de operación es de 12V(+/- 0.5V)
- Temperatura de trabajo -15-65°C, humedad ≤ 95%
- Diámetro de monedas 15-29 mm, espesor 1.8-3.0mm
- Peso 340 g
- Dimensiones 11x13x6.8 cm

Figura 42. Monedero electrónico YD-M715.



Fuente: [http://www.rockolasyrockolas.net/producto-accesorios/billeteros monederos/](http://www.rockolasyrockolas.net/producto-accesorios/billeteros-monederos/)

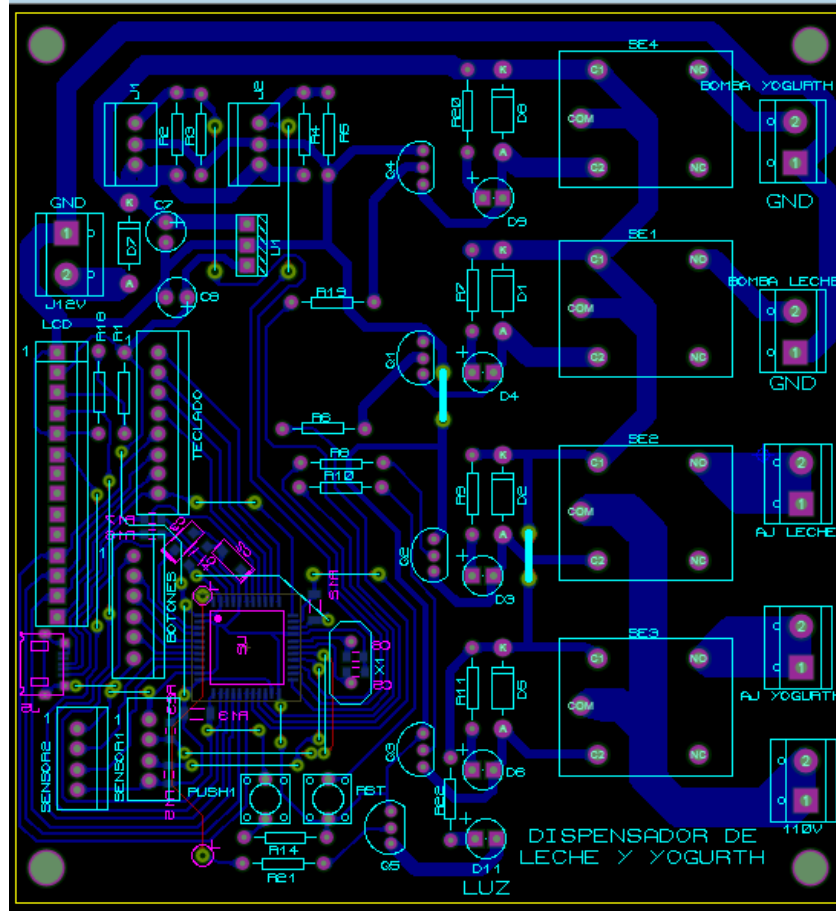
### **6.3 PLANO ELÉCTRICO DE CONEXIONES**

El diseño del plano eléctrico muestra en detalle la conexión de todos los dispositivos tanto de interfaz del usuario, como los que controlarán los motorreductores y las bombas a través de los relés electromecánicos. Ver (ANEXO H).

### **6.4 DISEÑO DE PLACA DE CIRCUITO IMPRESO PCB**

Esta placa será la encargada de conectar eléctricamente a través de las pistas conductoras, y sostener mecánicamente, por medio de la base los componentes electrónicos anteriormente especificados.

Figura 43. Diseño circuito impreso PCB.



## 6.5 PROGRAMA EN PLATAFORMA DE MICRO C PRO

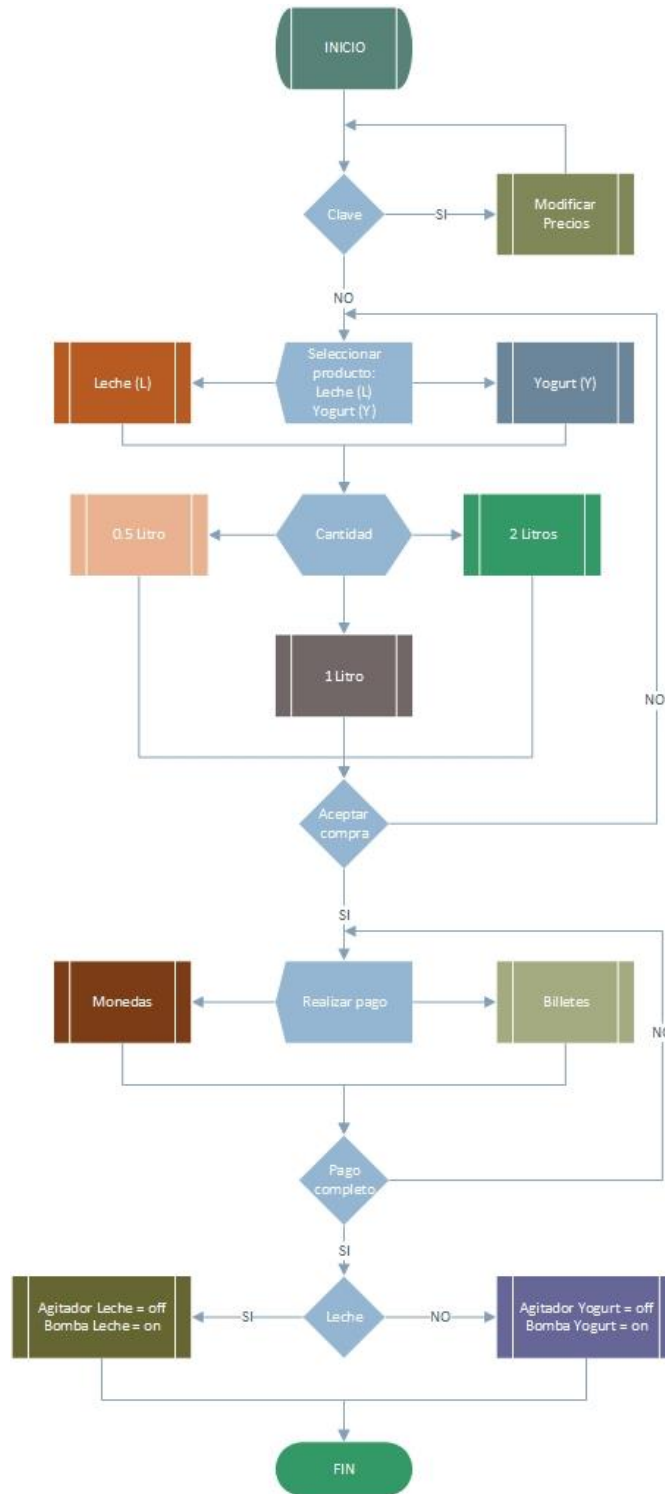
El desarrollo del programa se realizó en la plataforma de MicroC PRO for AVR. El ambiente de programación del microcontrolador no es complejo, lo que facilita la realización del código de tal manera que cumpla con los requisitos planteados a continuación.

Los principales requerimientos para desarrollar el código de programación para el sistema de control son los siguientes:

- Los dispositivos de cobro emiten pulsos de acuerdo al valor del billete o moneda, que se ingresa, donde para \$100 pesos emite un pulso, \$200 emite 2 pulsos, y así sucesivamente.
- Productos a dispensar: leche y yogurt.
- Tres cantidades: 1/2, 1 y 2 litros.
- Tiempos para dispensar, en la caracterización que se realiza de las bombas en el apartado (7.6) del presente documento. Se tiene: [0.5L 1L 2L]
  - Para la leche: [4,4 7,8 14,9] segundos.
  - Para el yogurt: [3,9 6,9 13,9] segundos.
- Mensajes en la pantalla lcd que orienten al cliente durante la compra, en la selección del producto y la cantidad.
- Señales de activación de la bomba correspondiente durante el tiempo establecido, a través de relés.
- Control de encendido y apagado de los motorreductores por medio de relés, de tal manera que no trabajen al mismo tiempo que las bombas, con el fin de evitar sobrecargas en el sistema eléctrico.
- Bucle dentro del programa, mediante el cual se puedan configurar los precios fácilmente a través de un teclado externo.

## 6.6 ALGORITMO DEL SISTEMA DE CONTROL

Figura 44. Algoritmo sistema de control.



## 7 SISTEMA DE BOMBEO

Para dispensar el producto se instalarán dos bombas una para cada tanque. El orificio de salida de los tanques según recomendación de las normas citadas anteriormente no debe ser menor a 38 mm. Por disponibilidad de bombas que se encuentran comercialmente para dispensar productos alimenticios con bajo flujo y baja presión de operación, estas bombas presentan conexiones de entrada y salida de hasta ½". Por tanto, el orificio de salida debe ser de ½", para el respectivo acople de la bomba y la válvula de salida.

El sistema de bombeo está compuesto por:

- Bomba 12v
- Válvulas de salida
- Manguera para alimentos

### 7.1 BOMBA 12 V

Este tipo de bomba opera a una presión baja, con un caudal acorde para dispensar productos líquidos en máquinas automatizadas. También se tiene en cuenta la altura de operación de la bomba de tal manera que pueda llevar el producto al cubículo del dispensador sin ningún problema. Es adecuada para el manejo de alimentos impidiendo cualquier contaminación del producto.

Figura 45. Bomba 12V TL-B10.



Fuente. <http://www.topsflo.com/brushless-dc-pump/brushless-dc-pump.html>

Tabla 11. Especificaciones técnicas Bomba 12V.

Especificaciones técnicas	
Voltaje	12 V (DC)
Amperaje máximo	1.4 (A)
Flujo máximo	9 L/min
Altura de bombeo	5 m
Entrada/salida	1/2"
Temperatura máxima del líquido	≤105 °C

## 7.2 VÁLVULA DE SALIDA

En cada tanque se instala una válvula de bola en acero inoxidable AISI 304 de 1/2", de tal manera que se facilite la conexión con la respectiva bomba. Su instalación se hace a la altura mínima posible desde la base del tanque, considerando la altura geométrica de la bomba, que contribuya a una mejor succión a la entrada de la bomba.

Figura 46. Válvula en acero inoxidable.

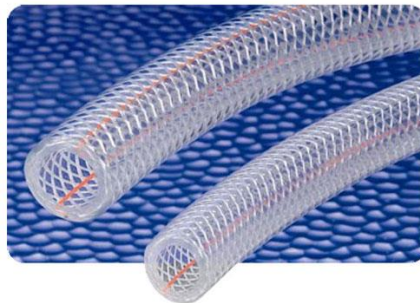


Fuente.<http://www.tododeinoxidable.com/Productos/Valvulas/ValvulasGradoIndustrial/tabid/148/Default.aspx>

### 7.3 MANGUERA PARA ALIMENTOS

Para dispensar el producto se instalará manguera especial para el manejo de alimentos, eliminando cualquier riesgo de contaminación. Este tipo de manguera flexible y robusta, fabricada en PVC con un espiral de acero entre la capa interna y externa que conforma la manguera, contribuye a una mejor sujeción tanto de la bomba como del tubo para dispensar. El material de la manguera no añade ningún tipo de olor permitiendo conservar las propiedades físicas del producto.

Figura 47. Manguera para alimentos.



Fuente. <https://www.rehau.com/download/1321456/catalogo-mangueras-industriales.pdf>

### 7.4 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO

Es necesario determinar los tiempos adecuados para dispensar el producto en las diferentes cantidades ofrecidas. La caracterización de la capacidad de dispensar el producto por parte de las bombas, se realiza teniendo en cuenta la relación que existe en toda bomba, altura de líquido con la capacidad de flujo. Para realizar la prueba se varía la altura empezando con la capacidad máxima en cada tanque, en cada nivel o altura de líquido, se toman tres tiempos para dispensar las cantidades ofrecidas 1/2, 1 y 2 litros.

Como recomendación del usuario que adquiere el prototipo, se considera un margen de error para dispensar de (+/- 5%) en el tanque de yogurt, un (+10% y - 5%) en el tanque de leche.

Tabla 12. Caracterización bomba y tanque de leche.

Capacidad tanque [L]	1/2 litro						1 litro						2 litros						
	t1	t2	t3	t promedio	Exceso 1 [ml]	Exceso 2 [ml]	t1	t2	t3	t promedio	Exceso 1 [ml]	Exceso 2 [ml]	t1	t2	t3	t promedio	Exceso 1 [ml]	Exceso 2 [ml]	
60	3,65	3,59	3,61	3,62	69	143	7	6,88	6,95	6,94	84	166	13,46	13,44	13,46	13,45	142	277	
56	3,69	3,81	3,76	3,75	49	119	7,09	7,12	7,12	7,11	58	139	14,02	13,81	13,91	13,91	71	202	
52	3,84	3,85	3,77	3,82	39	109	7,07	7,16	7,13	7,12	57	137	13,93	13,96	13,94	13,94	67	197	
48	4	3,95	3,99	3,98	17	84	7,06	7,13	7,11	7,10	60	140	14,01	13,92	13,98	13,97	63	193	
44	4,01	4,15	4,09	4,08	4	69	7,4	7,43	7,42	7,42	15	92	14,36	14,35	14,37	14,36	7	133	
40	4,11	4	4,07	4,06	7	73	7,51	7,61	7,57	7,56	-5	71	14,1	14,36	14,21	14,22	26	154	
36	4,15	4,08	4,13	4,12	0	64	7,53	7,38	7,47	7,46	9	85	14,31	14,16	14,23	14,23	24	152	
32	4,01	4,18	4,11	4,10	2	67	7,65	7,48	7,58	7,57	-6	70	14,41	14,53	14,48	14,47	-9	117	
28	4,09	4,15	4,13	4,12	-1	64	7,43	7,49	7,47	7,46	8	85	14,55	14,55	14,53	14,54	-19	106	
24	4,13	4,16	4,16	4,15	-4	60	7,63	7,66	7,66	7,65	-16	58	14,5	14,54	14,54	14,53	-16	109	
20	4,26	4,33	4,31	4,30	-21	41	8,08	7,72	7,91	7,90	-48	24	14,68	14,9	14,81	14,80	-53	70	
16	4,2	4,61	4,42	4,41	-33	27	7,68	8,07	7,89	7,88	-45	27	15	15,06	15,02	15,03	-82	39	
12	4,46	4,51	4,49	4,49	-41	18	8,21	7,93	8,06	8,07	-67	4	14,83	15,03	14,92	14,93	-70	52	
8	4,51	4,78	4,66	4,65	-57	0	8,16	8,04	8,09	8,10	-71	0	15,38	15,26	15,31	15,32	-119	0	
	TIEMPO PROMEDIO TOTAL			4,12			TIEMPO PROMEDIO TOTAL			7,52			TIEMPO PROMEDIO TOTAL			14,41			

Tabla 13. Caracterización bomba y tanque de yogurt.

Capacidad tanque [L]	1/2 Litro						1 Litro						2 Litros						
	t1	t2	t3	Promedio	exceso 1 [ml]	exceso 2 [ml]	t1	t2	t3	Promedio	exceso 1 [ml]	exceso 2 [ml]	t1	t2	t3	Promedio	exceso 1 [ml]	exceso 2 [ml]	
20	3,58	3,61	3,65	3,61	15	32	6,65	6,69	6,72	6,69	26	48	13,4	13,5	13,55	13,48	39	73	
18	3,60	3,65	3,66	3,64	12	28	6,72	6,78	6,82	6,77	12	34	13,58	13,46	13,6	13,55	29	63	
16	3,68	3,71	3,66	3,68	5	22	6,85	6,9	6,7	6,82	6	28	13,68	13,6	13,8	13,69	7	41	
14	3,74	3,70	3,80	3,75	-3	13	6,88	6,91	6,90	6,90	-6	16	13,85	13,81	13,92	13,86	-17	16	
12	3,76	3,80	3,85	3,80	-11	5	6,91	6,98	7	6,96	-15	6	13,88	13,96	13,89	13,91	-24	9	
10	3,81	3,82	3,90	3,84	-16	0	7,06	6,93	7,03	7,01	-21	0	13,93	14,01	13,98	13,97	-33	0	
	TIEMPO PROMEDIO TOTAL			3,72			TIEMPO PROMEDIO TOTAL			6,86			TIEMPO PROMEDIO TOTAL			13,74			

En la tabla podemos observar dos tipos de excesos, los cuales tienen que ver con el tiempo elegido para dispensar el producto en todos los niveles de altura del tanque. Si elegimos el tiempo promedio total se puede ver que al momento de dispensar en niveles de altura cercanas a la capacidad máxima del tanque (exceso 1), se dispensa un volumen mayor al ofrecido; para alturas cercanas al nivel mínimo del tanque, se dispensa un volumen menor de producto al ofrecido.

La otra alternativa es determinar como tiempo crítico para dispensar, el tiempo máximo, esto es cuando el nivel de producto en el tanque es el mínimo. Tomando como referencia este tiempo, la cantidad de volumen dispensado se incrementa a medida que la altura de líquido en el tanque es mayor (exceso 2), sobrepasando altamente el margen de error.

Debido a estas situaciones y teniendo en cuenta el margen de error para dispensar, se opta por tomar el tiempo promedio entre los tiempos empleados en el análisis de cada una de las alternativas, el tiempo promedio total y el tiempo máximo correspondiente a la altura de nivel mínima en el tanque.

Tabla 14. Tiempos para dispensar las cantidades ofrecidas del tanque de leche.

	<b>1/2 Litro</b>	<b>1 Litro</b>	<b>2 Litros</b>
<b>Tiempo promedio total [s]</b>	4,1	7,5	14,4
<b>Tiempo máximo [s]</b>	4,7	8,1	15,3
<b>Tiempo final [s]</b>	<b>4,4</b>	<b>7,8</b>	<b>14,9</b>

Tabla 15. Tiempos para dispensar las cantidades ofrecidas del tanque de yogurt.

	<b>1/2 Litro</b>	<b>1 Litro</b>	<b>2 Litros</b>
<b>Tiempo promedio total [s]</b>	3,7	6,9	13,7
<b>Tiempo máximo [s]</b>	3,8	7,0	14,0
<b>Tiempo final [s]</b>	<b>3,9</b>	<b>6,9</b>	<b>13,9</b>

## 8 PRUEBAS DE DESEMPEÑO Y FUNCIONAMIENTO

### 8.1 PRUEBAS DE ENFRIAMIENTO

Las pruebas de funcionamiento del sistema de enfriamiento, se realizaron utilizando agua en lugar de leche, ya que las propiedades son similares. Las pruebas se llevaron a cabo en la ciudad de Bucaramanga, señalando las diferencias en las condiciones atmosféricas en comparación con el lugar donde se instalará la máquina.

El sistema construido para la realización de las pruebas de enfriamiento está conformado de la siguiente manera:

Figura 48. Tanques de almacenamiento.

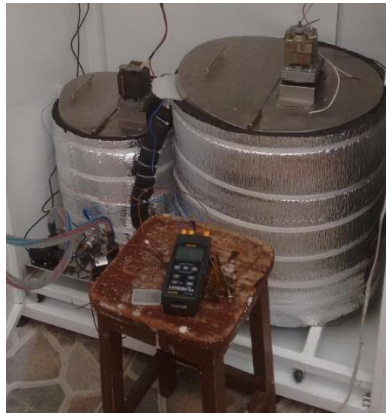
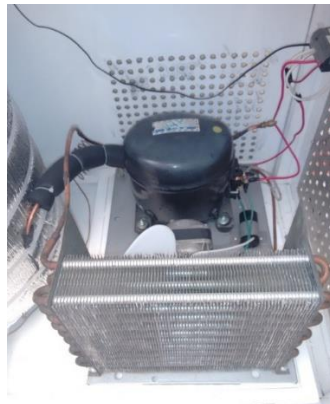


Figura 49. Unidad condensadora.



Para obtener la temperatura se utiliza un termómetro digital GENERAL DT4947SD, para registrar las temperaturas según la disposición de las termocuplas, además del sensor del controlador de la temperatura de la unidad condensadora.

Figura 50. Termómetro digital GENERAL DT4947SD.



Fuente.<http://www.generaltools.com/4-channel-thermocouple-thermometer-with-excel-formatted-data-logging-sd-card.html>

Las tres pruebas que se realizaron tendrán como objetivo:

- Mostrar la variación de temperatura con el tiempo en los dos tanques durante la etapa de enfriamiento.
- Evidenciar el delta de temperatura presente en distintos puntos dentro del tanque respectivo.

### **Prueba N°1: ENFRIAMIENTO DE LOS DOS TANQUES.**

Sitio de pruebas: Barrio Campo Hermoso, Bucaramanga.

Temperatura ambiente del sitio: 25 [°C]

Presión atmosférica: 959 msnm

Fluido utilizado: Agua

Temperatura inicial del agua: 12°C

En esta primera prueba se dispuso de una termocupla tipo K en cada tanque, ubicadas a la altura media, teniendo en cuenta la ubicación del agitador no se colocaron en el punto medio del diámetro geométrico del tanque, evitando el contacto entre estos.

La realización de esta prueba busca obtener el comportamiento de la temperatura del volumen de fluido contenido en cada tanque en función del tiempo, determinando el tiempo necesario que emplea el sistema de refrigeración para llevar el fluido a la temperatura de conservación. De igual modo nos permite visualizar el delta de temperatura entre el producto de cada tanque. Los motorreductores estarán encendidos, realizando la agitación respectiva mediante los agitadores.

Figura 51. Distribución sensor prueba 1 tanque de yogurt.

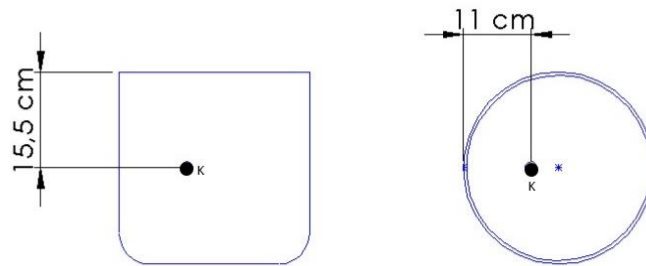


Figura 52. Distribución sensor prueba 1 tanque de leche.

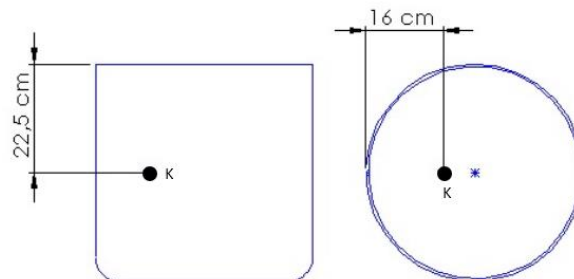
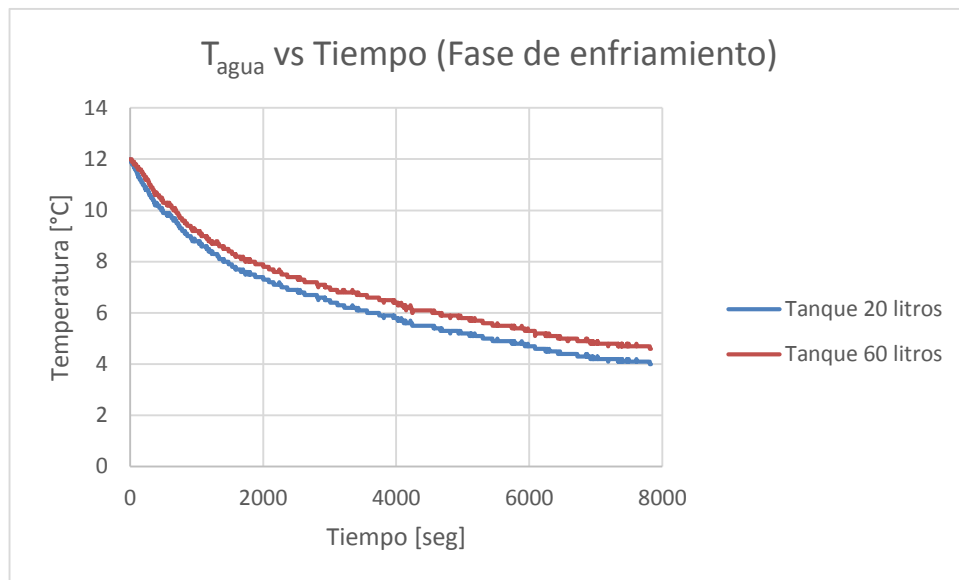


Figura 53. Temperatura del agua fase de enfriamiento prueba 1.



### Prueba N°2: ENFRIAMIENTO TANQUE DE 20 LITROS (YOGURT).

Sitio de pruebas: Barrio Campo Hermoso, Bucaramanga.

Temperatura ambiente del sitio: 27 [°C]

Presión atmosférica: 959 msnm

Fluido utilizado: Agua

Temperatura inicial del agua: 12 [°C]

Mediante la realización de esta prueba se determina el delta de temperatura en tres puntos diferentes durante la etapa de enfriamiento. Se ubican tres termocuplas tipo K, en puntos estratégicos que evalúen el comportamiento de la temperatura del agua en función del tiempo, desde la temperatura de ingreso hasta la temperatura de conservación 4°C.

Figura 54. Distribución de sensores prueba 2, tanque de yogurt.

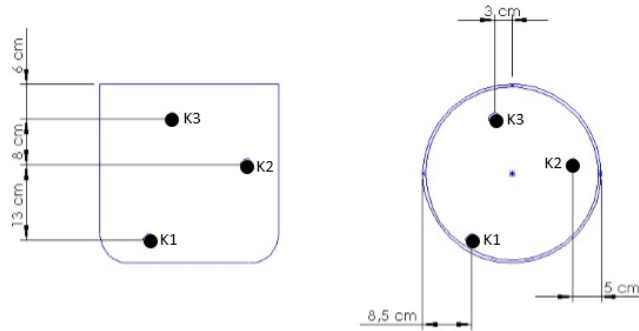
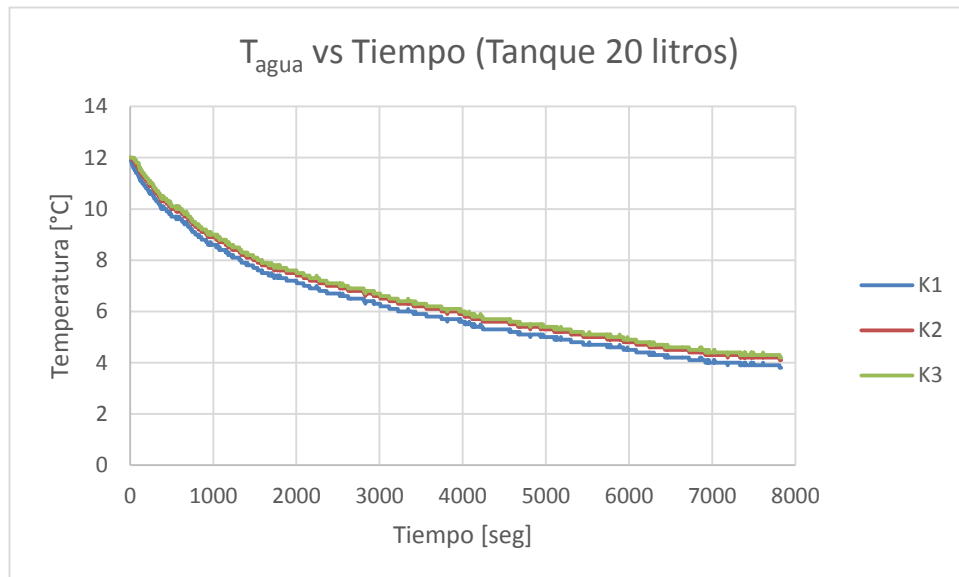


Figura 55. Fase de enfriamiento en tres puntos distintos del tanque de 20 Lts.



**Prueba N°3: ENFRIAMIENTO TANQUE DE 60 LITROS (LECHE).**

Sitio de pruebas: Barrio Campo Hermoso, Bucaramanga.

Temperatura ambiente del sitio: 26 [°C]

Presión atmosférica: 959 msnm

Fluido utilizado: Agua

Temperatura inicial del agua: 12 [°C]

Similar a la prueba 2, se busca determinar el gradiente de temperatura presente en tres puntos diferentes dentro del tanque de capacidad de 60 litros.

Figura 56. Distribución de sensores prueba 3, tanque de leche.

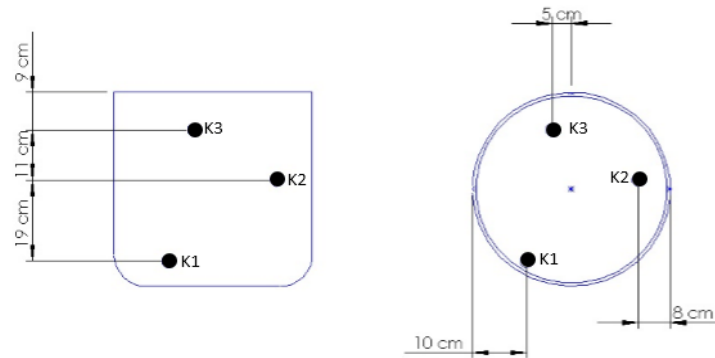
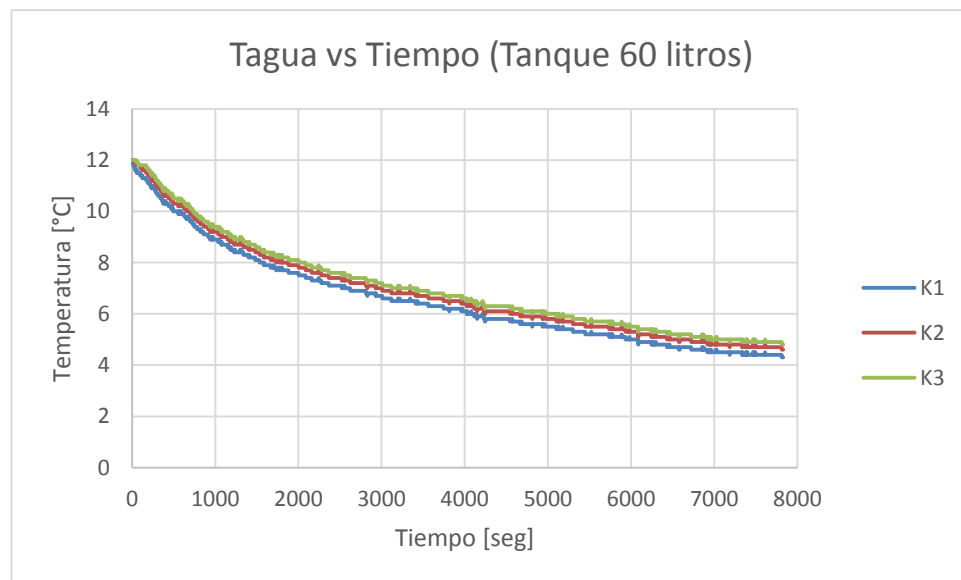


Figura 57. Fase de enfriamiento en tres puntos distinto del tanque de 60 Lts.



## 8.2 ANALISIS DE RESULTADOS PRUEBA DE ENFRIAMIENTO

Según los resultados obtenidos anteriormente, el sistema de refrigeración logra llevar a la temperatura de conservación el producto almacenado, de igual modo se tiene en cuenta que:

- El tiempo de enfriamiento obtenido mediante las pruebas fue aproximadamente de 7800 segundos, lo cual equivale a un exceso de 10 minutos respecto al tiempo de diseño empleado, el cual se fijó en 7200 segundos (2 horas).
- Se presenta un delta de temperatura máximo entre los dos tanques de 0,8 °C, lo cual hace necesario fijar un set point menor del sistema de control de la temperatura de la unidad condensadora, este sería de 3°C-5°C, lo cual reduce la temperatura en el tanque de 60 litros destinado para la leche, conservando el producto en este tanque en el rango recomendado.
- Las temperaturas registradas en diferentes puntos de los tanques, no presentan gradientes de temperatura importantes, lo cual permite una refrigeración homogénea de todo el producto.
- El sistema de agitación empleado contribuye a una refrigeración uniforme de todo el volumen de fluido, evitando deltas de temperatura entre puntos ubicados en el interior del tanque, donde el mayor diferencial de temperatura alcanzado fue 0,5°C.

### **8.3 PRUEBAS FUNCIONAMIENTO SISTEMA DE CONTROL Y DISPENSADOR**

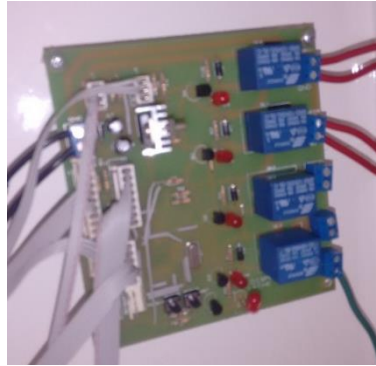
Mediante la realización de la siguiente prueba se analiza el funcionamiento del sistema de control electrónico y de bombeo del fluido:

Para realizar la prueba se integran los siguientes sistemas:

#### **Sistemas de control electrónico y dispositivos de interfaz con el usuario:**

- **Placa electrónica:** se encargará de recibir las señales electrónicas de los dispositivos de interfaz con el usuario, y accionando los equipos respectivos en base a lo solicitado por los clientes.

Figura 58. Placa electrónica.



- **Dispositivos de interfaz con el usuario:** se encargaran de comunicar al cliente los productos ofrecidos y las cantidades, de igual modo la selección respectiva de acuerdo a la necesidad del comprador. También recibirán el pago por el producto seleccionado.

Figura 59. Dispositivos de interfaz con el usuario.



### **Sistema de tanques, bombas y dispensador.**

- **Tanques:** almacenarán el producto, conservándolos a una temperatura de conservación óptima que impida el deterioro de las propiedades físicas del producto.
- **Bombas:** se encargarán mediante la señal emitida por la placa de control de dispensar a través de las mangueras, la cantidad de producto

seleccionado, teniendo en cuenta los tiempos determinados anteriormente para cada cantidad.

Figura 60. Sistema de bombeo.



- **Dispensador:** es el cubículo de captación del producto final, donde mediante dos boquillas diferenciadas para cada producto, dispensará el producto elegido por el cliente en la cantidad respectiva.

Figura 61. Cubículo para dispensar el producto.



### **PRUEBA N°1. Dispensar 1/2 litro de Leche.**

Fluido utilizado: Agua.

Mediante esta prueba se pretende comprobar el funcionamiento de los dispositivos que sirven de interfaz con el cliente en el momento de realizar la venta, como la

pantalla y los botones electrónicos. De igual modo, si la operación de los sistemas de cobro electrónico realizó correctamente su función, aceptando monedas y billetes, y enviando la respectiva señal de cuánto dinero se va ingresando. Después se analiza la cantidad de fluido dispensado mediante las bombas y los conductos hasta el recipiente de captación ubicado por el cliente.

Al realizar la alimentación del sistema, la pantalla muestra los productos disponibles. Se selecciona el producto Leche (L).

Figura 62. Selección producto prueba 1 sistema de control.



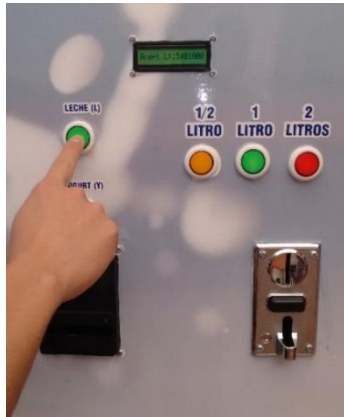
Al seleccionar el producto deseado, la pantalla pasa a indicar las cantidades que puede ofrecer el dispensador (.5-1/2 litro, 1-1 litro y 2-2 litros). Se selecciona 1/2 litro (.5).

Figura 63. Selección cantidad 0.5 litro.



Una vez seleccionado la cantidad de producto que se quiere comprar, la pantalla muestra la opción de aceptar (Acept). Oprimiendo el botón del producto seleccionado aceptamos la compra.

Figura 64. Aceptación del producto.



Después de aceptar ubicamos el recipiente en el cubículo, para recibir el producto.

Figura 65. Ubicación del recipiente en el cubículo dispensador.



Ahora comprobamos el funcionamiento de los dispositivos de cobro, como para esta compra el valor es de \$1000, ingresamos un billete de \$1000.

Figura 66. Pago con billetes de \$1000.



Cuando se ingresa la totalidad del pago, como en este caso, la bomba respectiva se acciona y empieza a dispensar el producto elegido. Se observa en la pantalla el mensaje de (Trabajando!). En este paso se comprueba si el tiempo determinado anteriormente para dispensar 1/2 litro de leche, es el indicado. Para ello se realiza la medición del volumen del fluido captado en el recipiente.

Figura 67. Liquido dispensado prueba 1 sistema de control.



**PRUEBA N°2. Dispensar 1 litro de yogurt.**

Fluido utilizado: Agua

Se sigue el procedimiento descrito anteriormente. El valor fijado para este producto es de \$5000, lo que permitirá comprobar el funcionamiento de los dos dispositivos de cobro. De igual modo se determina la cantidad de fluido dispensado, para el tiempo establecido correspondiente a la cantidad de un litro del tanque de leche.

Figura 68. Selección producto prueba 2 sistema de control.



Proceso de pago con billetes de \$2000.

Figura 69. Pago con billetes de \$2000.



Faltando \$1000, se paga con monedas.

Figura 70. Pago con moneda de \$500.



Se paga dos veces con la moneda de \$200.

Figura 71. Pago con moneda de \$200.



Después de quedar \$100 por pagar se inserta la moneda de \$100 para que empiece a dispensar.

Figura 72. Pago con moneda de \$100.



El sistema empezó a dispensar y mediante el recipiente tomamos el líquido y procedemos a comprobar que cantidad dispense de acuerdo con los tiempos establecidos.

Figura 73. Líquido dispensado prueba 2, sistema de control.



Para encontrar el volumen de líquido, se pesó cada jarra mediante una balanza gramera después de cada prueba, de acuerdo a las cantidades de trabajo y la altura de líquido del tanque.

Figura 74. Balanza gramera.



Fuente. <http://www.darsperu.com/productos.html>

En la tabla 16, se puede observar el exceso de producto dispensado para cada producto y cantidad, relacionado a la altura del tanque de 20 litros.

Tabla 16. Resultados prueba sistema de control y bombeo, tanque 20 litros.

Capacidad tanque [L]	1/2 Litro	1 Litro	2 Litros
	MI		
20	23	37	56
18	20	23	46
16	13	17	24
14	5	5	0
12	-3	-5	-7
10	-8	-11	-16

Como se puede observar las diferencias de producto dispensado con el ofrecido, están dentro del margen de error establecido, por lo tanto se comprueba que el funcionamiento del sistema de control y de bombeo cumple con los requisitos en el tanque de 20 litros.

En la tabla 17, se reflejan los resultados para dispensar el producto desde el tanque de 60 litros.

Tabla 17. Resultados prueba sistema de control y bombeo, tanque de 60 litros.

Capacidad tanque [L]	1/2 Litro	1 Litro	2 Litros
	MI		
60	49	96	125
56	46	89	118
52	44	82	102
48	38	72	96
44	29	53	90
40	26	33	85
36	20	44	70
32	16	32	54
28	9	27	44
24	2	21	46
20	-3	-12	9
16	-10	-9	-22
12	-17	-32	-26
8	-24	-35	-42

En el tanque de leche la cantidad de producto dispensado varía más en relación con el tanque de 20 litros. Según el margen manejado para dispensar el producto para este tanque se tiene:

- ½ litro: +50ml ó -25ml
- 1 Litro: +100ml ó -50ml
- 2 Litros: +200ml ó -100ml

A través de los resultado podemos comprobar que aunque las diferencias para el tanque de 60 litros, son más grandes respecto al tanque de 20 litros, el margen de error se cumple, logrando dispensar el producto con el sistema de bombeo instalado.

#### **8.4 ANALISIS DE RESULTADOS PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO SISTEMA DE CONTROL Y DISPENSADOR**

Las pruebas realizadas permitieron comprobar el funcionamiento del sistema de control, y de los dispositivos de dispensación. La pantalla ha mostrado los

mensajes acordes logrando una fácil interacción con el cliente, lo cual permite un fácil proceso de compra. Los dispositivos de cobro funcionaron en óptimas condiciones, restando el valor de pago en cuanto se iba pagando, y aceptando las denominaciones de monedas y billetes, especificadas inicialmente. El sistema de bombeo no presentó problemas para dispensar el producto, y en base a los tiempos prefijados, el volumen de líquido dispensado corresponde con las cantidades que se solicitaron en la prueba.

## 9. PRESUPUESTO

En la elaboración del presupuesto empleado para la construcción del prototipo, se tiene en cuenta los materiales, la mano de obra, costo de ingeniería y dirección del proyecto.

Tabla 18. Costos de construcción.

N°	Descripción	Valor
1	Lámina de acero inoxidable calibre 18 3X1 mts	\$ 430.000
2	Válvulas de acero inoxidable 1/2"	\$ 100.000
3	Compresor EMBRACO 1/3 HP	\$ 220.000
4	Condensador	\$ 120.000
5	Motor, ventilador, aspa y base	\$ 50.000
6	Metros tubo de cobre capilar	\$ 25.000
7	Evaporador de cobre de 3/8" x 7 mts	\$ 70.000
8	Controlador de temperatura Full gauge	\$ 130.000
9	Tubo acero estructural cuadrado galvanizado 25x25x1.5 mm	\$ 190.000
10	Lámina de acero galvanizado 5x2 mts	\$ 250.000
11	Pintura electrostática	\$ 300.000
12	Lámina adhesivo del gabinete	\$ 150.000
13	Aislante térmico 2x1.5 mts	\$ 25.000
14	Motorreductores 110v 25 RPM	\$ 360.000
15	Bomba 12v	\$ 260.000
16	Manguera para alimentos 1/2" x 3 mts	\$ 27.000
17	Acoples en acero inoxidable 1/2"	\$ 30.000
18	Monedero electrónico	\$ 185.000
19	Billetero electrónico BV20	\$ 350.000
20	Fuente 12v	\$ 50.000
21	Display 16x1	\$ 10.000
22	Botones electrónicos	\$ 18.000
23	Placa de control electrónica ensamblada	\$ 200.000
24	Mano de obra	\$ 2.500.000
25	Ingeniería y dirección del proyecto	\$ 3.500.000
26	Imprevistos	\$ 450.000
	<b>TOTAL</b>	<b>\$ 10.000.000</b>

## 10. CONCLUSIONES

Se diseñó y construyó el prototipo de dispensador automático de productos lácteos refrigerados, con capacidad de almacenamiento de yogurt y leche, en tanques de 20 y 60 litros respectivamente. Teniendo en cuenta los requerimientos planteados por la norma técnica colombiana NTC 3559 y el código de práctica ecuatoriano CPE INEN 007, se construyeron los tanques en material y geometría idónea para realizar una efectiva conservación de los productos lácteos.

Los subsistemas que conforman el prototipo fueron integrados de forma adecuada, obteniendo un diseño compacto y una excelente distribución de los dispositivos, lo cual permite un fácil funcionamiento de la máquina y elimina cualquier riesgo de interferencia entre dichos sistemas.

El sistema de refrigeración instalado cumplió con la refrigeración de los productos desde su temperatura de ingreso hasta la temperatura de conservación establecida. El tiempo empleado para llevar a cabo la refrigeración se desvió del tiempo de diseño con el cual se realizaron los cálculos, una de las posibles causas es el análisis para el cálculo del evaporador, ya que mediante los cálculos se obtuvo una longitud de tubo pequeña, lo cual le impide al sistema una extracción de la carga térmica en un tiempo de dos horas.

El delta obtenido durante la prueba de enfriamiento hace replantear el setpoint del sistema de control de temperatura, ya que cuando el tanque de 20 litros ha alcanzado la temperatura de conservación, la temperatura en el tanque de 60 litros es 0,8°C mayor. El fijar el rango de control de temperatura entre 3-5°C, corrige sustancialmente este inconveniente, teniendo en cuenta que el tiempo de enfriamiento también aumenta.

El funcionamiento del sistema de agitación, cumplió una función de gran importancia durante la etapa de enfriamiento, ya que reduce los gradientes de temperatura entre puntos diferentes en el producto almacenado en el interior de

los tanques, traducidos también en la disminución del tiempo para llegar a la temperatura de conservación en cada tanque.

El diseño de la placa electrónica cumplió funcionalmente el control de los dispositivos de interfaz y de accionamiento, como los motorreductores y las bombas de dispensación. Donde no se presentaron problemas eléctricos durante la ejecución de las pruebas. Se determinó el código del programa de control, que los motorreductores presenten paradas en su funcionamiento mientras las bombas están operando, con el fin de que no se presenten sobrecargas en el sistema eléctrico.

Los dispositivos de pago electrónicos seleccionados, funcionaron sin ningún problema, aceptando la denominación de pago especificadas. La señal de pulsos eléctricos emitidos por los dispositivos no presentó inconvenientes durante la adecuación e integración para desarrollar el programa cargado en el microcontrolador de la placa.

El diseño de un cubículo cerrado para ubicar los dispositivos electrónicos, contribuyó con el óptimo funcionamiento del billeteo, el cual tiene un sensor sensible a la luz.

El margen de error considerado para la dispensación llevada a cabo por las bombas, desestimó la posibilidad de usar sensores dentro del tanque, lo cual implicaría mayores costos, inconvenientes para el mantenimiento de los tanques y mayores riesgos de contaminación. Igualmente por medio de las pruebas se comprobó que los tiempos caracterizados para dispensar, correspondieron con el volumen de líquido solicitado durante la compra, manteniendo el margen de error definido.

El desarrollo del proyecto fue de gran satisfacción para los autores, logrando un aprendizaje integral durante el proceso de construcción, desde la concepción de la idea, la elaboración de un plan, la recopilación de información científica y

tecnológica, siguiendo con el diseño, logrado mediante el uso de diferentes herramientas como el programa EES(Engineering Equation Solver), Matlab, Solidworks y MicrocPRO, terminando con la fase de construcción, superando los imprevistos y dificultades que se presentaron.

## 11. RECOMENDACIONES

Para la instalación y posterior funcionamiento del prototipo se debe leer antes el manual de operación.

La realización del mantenimiento preventivo es muy importante, se debe leer a detalle los pasos para realizar el mantenimiento indicado en el manual, de tal manera que no se afecte la instalación y el funcionamiento de los dispositivos en el interior del dispensador.

Se recomienda hacer un seguimiento de las ventas diarias por parte del propietario, con el fin de tener tiempos promedios para poder realizar un llenado continuo de los tanques.

Se sugiere ubicar el dispensador en un lugar protegido del sol, los dispositivos de cobro electrónico pueden presentar fallas, en especial el billetero el cual funciona mediante un sensor, sensible a la luz.

Cuando se requiera conservar solamente los productos a la temperatura de conservación, pero el sistema para dispensar no va a ser operado, se debe apagar el interruptor que alimenta el sistema de control electrónico, y se mantiene únicamente energizada la unidad condensadora.

## REFERENCIAS

ASHRAE handbook, fundamentals, 2009.

CELIS, Mauricio, & JUAREZ, Daniel. Microbiología de la leche. Seminario de procesos fundamentales físico-químicos y microbiológicos. Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional – edUTecNe. 2009.

CENGEL, Yunus A. Transferencia de calor y masa. Un enfoque práctico. 3 ed. México D.F. Mc Graw Hill. 2007.

CÓDIGO DE PRACTICA ECUATORIANO, INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN. CPE INEN 007, (1983). Código de práctica para instalación y servicio de tanques refrigerados para leche. Quito Ecuador.

DANFOSS, aplicación. Tanques de refrigeración de leche. Módulo 1, 2014.

EMERSON, Climate Technologies. Manual técnico de refrigeración y aire acondicionado. 2013.

FORMACION PROFESIONAL PRINCIPADO DE ASTURIAS. Técnico en montaje y mantenimiento de instalaciones de frío, climatización y producción de calor. Unidad 3: Selección de máquinas y equipos.

HERNANDEZ BENEDI, José M. La refrigeración de la Leche. Ministerio de Agricultura, Madrid. Disponible en:<<http://www.magraba.gob.es/ministerio>>.

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 3559. Transporte, Especificaciones para tanques de transporte de leche y sus derivados líquidos. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). Apartado 14237. Bogotá D.C.

KERN, Donald Q. Procesos de transferencia de calor. México D.F. CECSA. 1999.

McCABE, Warren L. SMITH, Julián C and HARRIOT, Peter. Operaciones unitarias en ingeniería química. 7 edición. McGraw-Hill. México, D.F. 2007.

MOTT, Robert L. Diseño de Elementos de Máquinas. Cuarta Edición. Pearson Educación, México, 2006. p. 405.