

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE EQUIPO DE REFRIGERACIÓN DE LECHE
CRUDA EN SITIO DE PRODUCCIÓN**

Por:

Luis Alberto Vega Iriarte

Tesis presentada para optar por el grado de

MAGÍSTER EN ESTUDIOS AMAZÓNICOS

Maestría en Estudios Amazónicos

Universidad Nacional de Colombia

Sede Amazonia

Bajo la dirección de:

MSc. Alberto Fajardo Oliveros

Candidato a Doctor en Ciencias-Química UN

Director Interno

MSc. Pedro Vanegas Mahecha

Docente Universidad Nacional de Colombia

Florencia, Caquetá, Colombia

2010

DEDICATORIA

A la memoria de mi gran ejemplo de vida, mi padre a quien junto con mi madre, a través de la gracia divina, les debo mi formación personal y profesional.

A las testigos fehacientes de este proceso iniciado en el año 2006 y de quienes he recibido aparte de la motivación como motores de mis propósitos, la fortaleza y acompañamiento incondicional. Son ustedes mis dos grandes amores como esposa e hija, dos seres maravillosos razón de ser de mi vida terrenal.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de La Amazonia, por facilitarme a través de la ayuda económica y la concesión de espacio y tiempo, el desarrollo de este estudio de posgrado.

A los señores Belisario y Luis Alberto Tovar, artífices tangibles de la construcción mecánica del prototipo, con base en el diseño determinado.

Al señor Alexander Gallego, por su ayuda incondicional en el montaje y puesta en marcha del sistema de refrigeración del prototipo, amén de los conocimientos adquiridos a través de su labor.

Al señor Juan Carlos Díaz, analista de laboratorio planta precondensación de la multinacional Nestlé con sede en la ciudad de Florencia, por su colaboración en el análisis microbiológico de las muestras lácteas.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT	xiii
INTRODUCCIÓN.....	15
1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	18
1.1 JUSTIFICACION	18
1.2 OBJETIVOS	20
1.2.1 Objetivo general.	20
1.2.2 Objetivos específicos.....	20
2. MARCO REFERENCIAL.....	22
2.1 ANTECEDENTES	22
2.2 MICROBIOLOGIA DE LA LECHE	24
3. DISEÑO METODOLÓGICO	27

3.1 UNIVERSO DEL ESTUDIO	27
3.2 CALCULOS DE DISEÑO.....	28
3.3 ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO	34
3.3.1 Procedimiento para la cuantificación de UFC/mL en muestras lácteas....	35
3.3.1.1 Preparaciones de arranque del BactoScan FC 50.	35
3.3.1.2 Procedimiento de arranque.	36
3.3.1.3 Análisis de muestras.....	38
3.3.1.4 Procedimiento de cierre.....	40
4. RESULTADOS. PRUEBA DE FUNCIONALIDAD	41
4.1 DESARROLLO DE CÁLCULOS DE DISEÑO	41
4.2 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN	87
4.3 DETERMINACIÓN DE LA OPERABILIDAD Y CUANTIFICACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL EQUIPO DE REFRIGERACIÓN	89
5. CONCLUSIONES.....	94
BIBLIOGRAFÍA.....	96
ANEXOS	98

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Requisitos microbiológicos en leche cruda.....	25
Tabla 2. Bonificación ó castigo por calidad higiénica en la zona de producción lechera No. 3.....	26
Tabla 3. Cuantificación del desempeño del prototipo.....	90

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Sección transversal de fondo tanque Isotermo.	41
Figura 2. Sistema de agitación del tanque isotermo.....	42
Figura 3. Cambio de fase de refrigerante.	43
Figura 4. Puntos de transferencia de calor del ETOH.	47
Figura 5. Transferencia de calor en el serpentín.	47
Figura 6. Transferencia de calor por radiación y convección.	50
Figura 7. Medidas externas del tanque isotermo.	52
Figura 8. Curvas para determinar LMTD.	54
Figura 9. Medidas de abertura superior del tanque isotermo.	55
Figura 10. Representación ánulo.	56
Figura 11. Vista superior ánulo en el evaporador (difusor).....	56
Figura 12. Diámetros externo e interno del evaporador.	57
Figura 13. Longitud del evaporador.	57
Figura 14. Ubicación puntos de entrada y salida R22.	58
Figura 15. Disposición de la espiral de cobre en el evaporador.	59
Figura 16. Disposición de serpentín (corte longitudinal).	59
Figura 17. Representación ETOH en el evaporador.....	62
Figura 18. Sección de tubería del serpentín.....	63

Figura 19. Curvas para cálculo LMTD (ETOH/R22).	65
Figura 20. Representación ánulo, disposición serpentín en el evaporador.	66
Figura 21. Diámetros de paredes en el evaporador.	69
Figura 22. Espacio anular.....	69
Figura 23. Espacio para acomodación del serpentín.	70
Figura 24. Área del espiral (tubo de cobre sin seccionar)	70
Figura 25. Área del espiral (desarrollo de tubería de cobre)	70
Figura 26. Acomodación espiral (serpentín).	71
Figura 27. Espacio entre espiras.	72
Figura 28. Acomodación espiral en doble hélice.	73
Figura 29. Enchaquetado del serpentín en el sistema anular del evaporador....	75
Figura 30. Radio de aislante térmico	75
Figura 31. Sistema de refrigeración.....	77
Figura 32. Ciclo Ideal de Refrigeración.	77
Figura 33. Sistema de refrigeración (balance de energía en el compuesto).	78
Figura 34. Sistema de refrigeración (equivalente).....	79
Figura 35. Coeficiente de transferencia de calor por convección y radiación.....	79
Figura 36. Cálculo de h_4 (evaporador).	80
Figura 37. Diagrama Th.	81
Figura 38. Balance de energía en el condensador.....	82
Figura 39. Balance de energía en el compresor.	82

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Plano equipo de refrigeración	98
Anexo B. Diseño de Autocad 3D. Vista lateral izquierda	99
Anexo C. Diseño de Autocad 3D. Vista lateral derecha	100
Anexo D. Diseño de Autocad 3D. Vista posterior izquierda.....	101
Anexo E. Diseño de Autocad 3D. Vista lateral superior.....	102
Anexo F. Diseño de Autocad 3D. Vista superior.....	103
Anexo G. Diseño de Autocad 3D. Vista frontal superior	104
Anexo H. Diseño de Autocad 3D. Vista superior	105
Anexo I. Construcción evaporador	106
Anexo J. Construcción isoterma	107
Anexo K. Válvula de expansión	108
Anexo L. Vista superior construcción evaporador	109
Anexo M. Vista frontal equipo de refrigeración	110
Anexo N. Evaporador inmerso en TK isoterma	111
Anexo O. Condensación en válvula de expansión y retorno	112
Anexo P. Condensación en línea compresor - condensador.....	113
Anexo Q. Condensación en válvula de expansión	114
Anexo R. Sistema de grafado.....	115

Anexo S. Funcionamiento (condensación) válvula de expansión.....	116
Anexo T. Vista posterior equipo de refrigeración.....	117
Anexo U. Vista lateral derecha Unidad compresora (en funcionamiento)	118
Anexo V. Vista lateral derecha equipo de refrigeración.....	119
Anexo W. Equipo de refrigeración en operación	120
Anexo X. Equipo de refrigeración en operación	121
Anexo Y. Temperaturas finales de operación, en unidad difusora y leche contenida en el tanque isoterma.....	122

RESUMEN

El propósito del diseño, construcción y validación del desempeño de un equipo de refrigeración de leche cruda para pequeños productores, se centró en las condiciones de producción lechera de la zona ganadera del Departamento del Caquetá, ubicada principalmente en la zona noroccidental del mismo. Una vez evacuados los cálculos termodinámicos, se determinó la viabilidad de la construcción de un prototipo económico y versátil con capacidad para el enfriamiento de 40L de leche en lotes del mismo volumen, teniendo como precedente la baja producción del 80% de los hatos lecheros existentes. El equipo consta de tres conjuntos, así: Generación de frío; compuesto por el compresor (Ver Anexos P, U), condensador, botella de líquidos, líneas de conducción, válvula de expansión (Ver Anexos K, O, Q, S) evaporador (difusor) construido en acero inoxidable para ser operado en inmersión. Conservación de frío; compuesto por un tanque isoterma (este elemento y el difusor de inmersión, construidos como adecuación tecnológica por parte del investigador(Ver Anexos I, J, L, y N.), el cual se diseñó para ser usado como contenedor de la misma leche enfriada para ser transportada hasta pasadas las diez horas desde su obtención a través del ordeño, sin ningún sistema frigorífico y a temperatura ambiente, conservando el frío suministrado únicamente por el equipo de refrigeración. Estructura; construida en tubería redonda de 1,5" de

diámetro calibre 18 (1,25mm) en acero inoxidable, norma ANSI 304. En la validación del desempeño del prototipo construido, se lograron temperaturas óptimas de refrigeración en la materia prima contenida en el tanque isoterma, elaborado a partir de una cantina convencional a la cual se le acondicionó un recubrimiento externo (enchaquetado) en lámina de aluminio, con inyección de poliuretano (como aislante térmico) entre las dos paredes. Las leches obtenidas por ordeño manual a ser intervenidas con cadena de frío, arrojaron en promedio 34.5°C de temperatura inicial y luego de setenta (70) minutos de operación del equipo en cuestión (Ver Anexo Y), estas fueron enfriadas a 0,3°C (temperatura en isoterma a la culminación del suministro de frío. Tratamiento No. 1), las que luego de haber transcurrido más de 9,5 horas del ordeño, arrojaron un recuento bacteriano de mesófilos totales de 9.000 UFC/mL, en contraposición al recuento arrojado por las leches cotidianamente manejadas a temperatura ambiente y en el mismo tiempo (Tratamiento No.2) las que mostraron un desarrollo microbiano de hasta 4.326.000 UFC/mL

Palabras claves: Refrigeración, mesófilos, leche, poliuretano, termodinámica.

ABSTRACT

The purpose of the designing, construction and validation of the performance of a cooling equipment for raw milk aimed to smallholders, was focused on the conditions of dairy production through pasturelands zone in the Department of Caquetá. The most of this zone is located in the northwestern area of the department. After getting thermodynamic calculations, the viability of the construction of a cheap and versatile prototype with capacity to cool 40 L of milk in bulks of the same volume was determined. The low production in 80% of the existing cattle ranches was taken as a precedent. The equipment consists of three sets as follows: Generation of cold; made up of the compressor, capacitor, bottle of liquids, power lines, evaporator (diffuser), which is constructed in stainless steel in order to be operated in immersion. Conservation of cold; made up of the isotherm tank, which, the same as the diffuser of immersion, were constructed by the researcher as a technological adaptation. This tank was designed for being used as a container of the same chilled milk. And that milk can be transported even ten hours later it's milking without needing any refrigeration system and at room temperature. The only cold that milk keeps is the one provided by the cooling equipment. Structure; built in 1.5" stainless steel round pipe with a 18 diameter (1,25mm) according to the standards of ANSI (American National Standards Institute) 304 rule. During the performance

validation of the constructed equipment, optimal temperatures in the raw product that was contained within the isotherm tank were gotten. This tank was made from a traditional pail which was adequate with an external aluminium coating (jacketing) which is provided with a injection of polyurethane (as a thermal insulator) between the two walls. The obtained milks through milking by hand, which were later operated with cooling chain, yielded on average 34.5⁰ C of initial temperature. After 70 minutes of operation of the cooling equipment, the milks were chilled to 0,3⁰C (isothermal temperature by the termination of cold providing. Treatment Number 1). After having elapsed more than 9,5 hours from the milk, those milks yielded a total bacterial recount of 9.000 CFU/mL as opposed to the recounting yielded by the milks operated at room temperature and in the same period of time (treatment number 2), which showed a microbial growth up to 4.326.000 CFU/mL

Keys words: Cooling, mesophilic, milk, polyurethane, thermodynamics

INTRODUCCIÓN

La calidad microbiológica de las leches crudas depende en gran medida de su carga bacteriana inicial y del tiempo que tarde en aplicarse la cadena de frío, Walstra (2001). Para Cousin (1982), Suhren (1988), Meers et al., (1991), Muir (1996) a,b,c, Sorhaug&Stepaniak (1997), los microorganismos son responsables de diversos cambios físicos y organolépticos que se producen en la leche cruda, y para la International Commission on Microbiological Specifications for Foods ICMSF (2001), el único medio de prolongar la vida útil de la leche cruda manteniendo sus características originales es previniendo ó inhibiendo el crecimiento de las bacterias lácticas causantes de la acidificación de la leche, es a través del enfriamiento. Según Hayes (1993), debido a que la leche es un medio de crecimiento ideal para las bacterias, esta debe enfriarse tan rápido como sea posible. El crecimiento de las bacterias acidolácticas en la leche es posible inhibirlas utilizando la cadena de frío desde el sitio de producción lechera, a través de un sistema práctico, eficiente, económico y ajustado a los pequeños volúmenes de producción (el 78% de los proveedores de la multinacional Nestlé en el Departamento del Caquetá, comercializan en promedio 80 L de leche cruda / día) de las fincas de ganadería extensiva doble

propósito, el cual garantice temperaturas de refrigeración por el tiempo suficiente para que el producto sea conducido a un tanque de enfriamiento comunitario, ó directamente a las plantas de proceso agroindustriales para su transformación, toda vez que según Speer (1991), disponer de leche cruda de buena calidad es una condición fundamental si se pretende elaborar productos lácteos de excelente calidad.

El equipo sugerido para contribuir a la solución de la problemática evidenciada se diseñó y ajustó a las condiciones de producción y manejo de la leche cruda en la región, el cual está formado por tres (03) conjuntos constitutivos, así:

Sistema de refrigeración: El sistema de generación de frío opera bajo el principio del ciclo de refrigeración, conformado por: Unidad compresora, condensador enfriado por aire, difusor (evaporador) para operabilidad en inmersión (el cual estará en contacto directo con la leche), moterreductor con aspa para agitación del fluido a enfriar, amén de la tubería y válvulas.

Sistema de conservación: Sistema de conservación de frío, compuesto por un tanque isoterma, con capacidad para 40 L, de doble camisa y aislado en poliuretano, tanque y sistema de enfriado que marca la diferencia competitiva con los convencionalmente encontrados en el mercado, cuya capacidad mínima de almacenamiento es de 580 L, a costos que superan los \$25.000.000, cifra onerosa para el modesto productor.

Sistema estructural: Construido en tubería redonda en acero inoxidable referencia ANSI 304, de 1.5 pulgadas de diámetro, la cual ofrece rigidez y estabilidad estructural.

Los requerimientos energéticos eléctricos para el equipo construido son de corriente AC 220 V, aportada por la red comercial ó un motogenerador de 2800-3000 Watt, el cual aparte de ser utilizado en horas del día en el proceso de enfriado de la leche, puede ser operado libremente en actividades cotidianas que requieran de fluido eléctrico.

1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

1.1 JUSTIFICACION

La calidad microbiológica de la leche producida en buena parte del Departamento del Caquetá, cuyo promedio diario esta en el orden de los 450.000L/día, según datos obtenidos del laboratorio de la multinacional Nestlé ubicada en la ciudad de Florencia, la cual procesa actualmente 120.000 L de leche / día, provenientes de 1523 productores, se encuentra por fuera de los parámetros higiénicos mínimos para la zona de producción lechera No. 3, que abarca los departamentos de Cesar, Guajira, Atlántico, Bolívar, Sucre, Córdoba, Magdalena, Norte de Santander, Santander y Caquetá; la cual establece como estándar de recuento total de bacterias (UFC/mL), 700.000 gérmenes Ministerio Salud MINSALUD (2006). Según informes de laboratorio de la mencionada multinacional, los reportes de recuentos de mesófilos totales se encuentran en promedio de 900.000 UFC/mL. Datos que inequívocamente demuestran deficiente calidad higiénica de las leches producidas en esta parte del país. La calidad microbiológica de la leche cruda, depende en gran medida de las condiciones de las Buenas Prácticas de Producción Lechera BPPL y de la cadena de frío aplicada desde el momento mismo de la obtención del producto,

por ordeño manual ó mecánico. Actualmente en el Caquetá, existen 190 tanques de enfriamiento de leche con capacidad de 850 L c/u, los cuales en promedio atienden las necesidades de enfriamiento de 8-10 productores, ofreciendo así cadena de frío parcial (no es aplicable a todos los productores desde el momento mismo del ordeño) a un volumen de 161.500 L de los 450.000 L que se producen diariamente en el departamento NESTLÉ (2007). Por lo anterior, se evidencia la carencia de equipos de refrigeración de leche cruda accesibles en cada uno de los hatos lecheros de la región, adaptados a las condiciones propias de la misma (bajos ingresos económicos, vías en mal estado, distancias considerables entre hatos lecheros y plantas de procesos agroindustriales, carencia de fluido eléctrico y condiciones ambientales adversas, con temperaturas de 27°C en promedio anual).

El presente documento sustenta el trabajo de grado presentado para optar al título de Magíster en Estudios Amazónicos en la línea de investigación Desarrollo Regional Amazónico, dentro del convenio Universidad Nacional de Colombia Sede Amazonia y la Universidad de La Amazonia. El motivo fundamental sobre el cual se basó el estudio de investigación, se sustenta en la particularidad socio-económica y ambiental que se presenta en la Amazonia Noroccidental Colombiana, específicamente en el piedemonte del Departamento del Caquetá, en donde la economía especialmente agraria se genera en la producción lechera, con un volumen aproximado de 450.000 L/día, convirtiéndose en la mayor fuente de ingresos lícitos de los campesinos de la

región. Inherente al proceso productivo se presentan serios problemas sanitarios en la calidad microbiológica de la materia láctea, especialmente por el escaso ó nulo proceso de cadena de frío desde su producción, lo que deriva en alteraciones físicas, químicas y microbiológicas de la leche, lo cual altera de manera significativa la calidad de la misma en detrimento de la salud de los consumidores. Por ello, en el ánimo de contribuir con la sumatoria de acciones tendientes a subsanar la problemática citada, se enunciaron los siguientes objetivos ó propósitos:

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general.

Diseñar, construir y evaluar un equipo de refrigeración de leche cruda para su utilización en el sitio de producción, ajustado a las condiciones de producción lechera en el Departamento del Caquetá.

1.2.2 Objetivos específicos.

Realizar los cálculos pertinentes para el diseño de un equipo de refrigeración de leche cruda producida en fincas ganaderas doble propósito, teniendo en cuenta los bajos volúmenes de producción, la temperatura del medio ambiente y las distancias entre los hatos lecheros y los centros de acopio y/o transformación.

Construir el prototipo a escala real, con los elementos y materiales definitivos para una posible producción en serie.

Determinar la operabilidad, eficiencia y eficacia del equipo, con el ánimo de cuantificar y validar su desempeño.

2. MARCO REFERENCIAL

2.1 ANTECEDENTES

La refrigeración como sistema de conservación alimentaria, especialmente de la leche cruda no es un tema nuevo. La industria láctea tiene definida las condiciones de conservación de sus materias primas a través de tanques de almacenamientos con doble pared (enchaquetados), entre las cuales se hace fluir agua con temperatura de entre 2 y 4°C, la que por transferencia térmica mantiene la leche almacenada en condiciones óptimas de conservación. En el área de producción primaria las condiciones son diferentes; actualmente (para la zona de producción láctea, especialmente en jurisdicción de los municipios del norte del Caquetá, por citar un ejemplo) la multinacional Nestlé ha provisto en sitios estratégicos en la zona lechera del Departamento, tanques de refrigeración para el acopio de leche financiados a los campesinos, los cuales tienen una capacidad de 850 L, atendiendo en promedio 8 productores, a un costo de \$ 25.000.000 c/u (Fuente: Gerencia Nestlé, Planta de Precondensación. Florencia-Caquetá.) situación poco ventajosa para la mayoría de los campesinos, tanto en lo económico, como en el hecho que hasta el momento es la única forma de refrigerar su producción láctea, pese a que tengan que trasladar su volumen de

leche a temperatura ambiente desde la finca al centro de acopio, para ser mezclada indiscriminadamente con otras leches de la región; de lo anterior se puede deducir que el único productor que posee sistema de refrigeración in situ y que puede asegurar la calidad microbiológica de su leche por inicio inmediato de cadena de frío, es aquel a quien se le ubicó el tanque de refrigeración en su predio. Lo anterior no cobija a aquellos productores que abastecen de materia prima la agroindustria láctea regional, que se abastece de leche cruda a temperatura ambiente, en algunos casos con más de 6 horas de ordeño y con recuentos de gérmenes totales de hasta 6.500.000 UFC/mL de carga inicial (Según información suministrada por transformador regional, con base en resultado de análisis de laboratorio), lo que pone en tela de juicio la calidad microbiológica de los productos terminados y por consiguiente la inocuidad de los mismos.

En investigación aplicada a la problemática inmediatamente citada, se tendrán en cuenta los estudios de Corral (1976), quien realizó un estudio de factibilidad, diseño y construcción de un sistema de enfriamiento de leche y Luengas (1981) diseñó una unidad refrigeradora para recolección y transporte de leche cruda. En cuanto a revisión de patentes, investigadores como Ovalle (2001) presentó la inclusión de "Equipo de refrigeración de leche por inmersión", consistente en la aplicación de frío por inmersión de la unidad evaporadora tipo serpentín (tubería) a través del cual se hace circular el gas refrigerante. También se puede mencionar el trabajo de Gutiérrez (2006) a quien le fue asignada revisión de

patente a la solicitud "Equipo para disminuir microorganismos en leche cruda en el ordeño para uso en hato lechero empleando altos campos de pulsos eléctricos con corriente eléctrica de baja intensidad en combinación con enfriamiento rápido.

2.2 MICROBIOLOGIA DE LA LECHE

La microbiología está estrechamente relacionada con todos los sectores de la industria lechera. Los principios microbiológicos son la base de las técnicas de producción higiénica de la leche, dirigen muchos de los tratamientos para su transformación industrial y son el fundamento de los métodos de conservación de los productos lácteos. La calidad de la leche y los productos lácteos depende en gran parte de su microbiología. Un aspecto fundamental de la calidad de la leche es su flora microbiana.

Desde el punto de vista cuantitativo, se considera que las leches con bajo niveles de población son de mejor calidad. Además del número, el tipo de microorganismos presentes en la leche también influye tanto en el aspecto higiénico como en el de la transformación. La leche, además de tener una composición química adecuada, tiene que ser de buena calidad higiénica; éste es un aspecto esencial para la salud pública, para la calidad de los productos lácteos y para que la leche pueda someterse a los distintos tratamientos tecnológicos (Walstra 2001). Por este motivo los organismos gubernamentales

establecen normas que señalan el número de microorganismos que se considera aceptable en la leche (Amiot 1991). Para el caso de Colombia, este precepto está regido por el Decreto 2838 de 2006, el cual reglamenta parcialmente el Decreto 616 de 2006 (Reglamento Técnico-leche para consumo humano), en cuyo Artículo 12, establece que la leche cruda y leche cruda enfriada para consumo humano directo deberá cumplir con el siguiente requisito microbiológico.

Tabla 1. Requisitos microbiológicos en leche cruda

Índice Permisible	Unidades
Recuento de mesófilos aeróbios UFC/mL	700.000

Fuente: Ministerio de la Protección Social. Resolución 2838 de 2006.

Con base en ello se tipificó la escala de bonificación ó castigo por litro de leche, en relación a su calidad microbiológica, así:

Tabla 2. Bonificación ó castigo por calidad higiénica en la zona de producción lechera No. 3

RANGO	ESCALA DE PAGO RECuento TOTAL DE BACTERIAS	ESCALA DE PAGO POR FRIO
UFC/mL	\$ L	\$ L
0 – 25.000	60	15
25.001 – 75.000	50	15
75.001 – 100.00	40	15
100.001 – 150.000	30	10
150.001 – 200.000	25	10
200.001 – 300.00	20	5
300.001 – 400.000	15	5
400.001 – 500.000	10	5
500.001 – 600.000	5	5
600.001 – 700.000	0	0
700.001 – 800.000	-10	0
800.001 – 900.000	-20	0
900.001 – 1.000.000	-30	0
1.000.001–1.100. 000	-40	0
1.100.001 ó más	-50	0

Fuente: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Resolución 012 de 2007

Para el caso que nos ocupa, teniendo por ejemplo el caso de un campesino con una producción diaria de 80 L, puede llegar a obtener \$ 1.752.000 / anuales, como valor agregado a su producción de alta calidad higiénica (menos de 25.000 UFC/mL, y aplicación de frío, \$ 75/L de bonificación), ó en su defecto, perder \$ 1.460.000 / anuales, por castigo relacionado con mala calidad higiénica. Circunstancias que inciden directamente en la economía familiar campesina, toda vez que la fuente principal de ingresos para el común del campesinado del Departamento del Caquetá, se deriva de la venta diaria de la producción lechera de su finca.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1 UNIVERSO DEL ESTUDIO

En el desarrollo de los cálculos pertinentes para el diseño y construcción de un equipo de refrigeración de leche cruda producida en fincas ganaderas doble propósito de la zona ganadera del Departamento del Caquetá, se tuvo en cuenta los bajos volúmenes de producción, la temperatura del medio ambiente y las distancias entre los hatos lecheros y los centros de acopio y/o transformación.

La validación de desempeño del equipo de refrigeración se llevo a cabo en condiciones reales en el hato lechero del Centro de Investigaciones Amazónicas Macagual, distante 20 Km de la ciudad de Florencia-Caquetá (Colombia) a 1°37'N y 75°36'W, altura de 300 msnm; con producción promedio de 65L de leche/día. La región se clasifica según Holdridgs (1978) como bosque húmedo tropical, presenta precipitación pluvial media anual de 3.835 mm, promedio de humedad relativa entre 79,5% y 88.6% y temperatura del aire media anual de 26°C (CORPOICA 2005).

El equipo se instaló momentos previos al ordeño manual, siguiendo el protocolo de limpieza y desinfección para maquinaria, equipos y utensilios a entrar en

contacto con una materia prima alimentaria (únicamente relacionados con el tratamiento térmico generado por el equipo de refrigeración), sin intervenir las condiciones higiénicas de producción (piso del establo, ubres, baldes, manos del ordeñador), toda vez que se buscaba la mayor objetividad posible en la obtención de resultados generados por procesos llevados a cabo de forma real y sin intervenir en los mismos. Una vez se obtenía la leche, esta se depositaba en el tanque isoterma hasta lograr un volumen de 36 L, para luego a través de inmersión colocar el evaporador (construido en acero inoxidable) dentro del tanque, momento en el cual se contabilizaba tiempo cero con un cronómetro digital, tomando el registro del mismo y de las temperaturas del interior del evaporador como de la leche contenida, con termómetros electrónicos, tal como lo muestra la tabla 3.

3.2 CALCULOS DE DISEÑO

FÓRMULAS MÁS RELEVANTES EMPLEADAS EN LOS CÁLCULOS DEL DISEÑO DEL EQUIPO DE REFRIGERACIÓN

Carga térmica (Q) que debe ser retirada de la leche cruda para su enfriamiento. Este es el dato base para la cuantificación y diseño de la unidad evaporadora y por consiguiente de los parámetros técnicos requeridos del sistema.

$$Q_{\text{leche}} = 36L * x \frac{1.032 \text{ Kg}}{L} * \frac{0,92 \text{ Kcal}}{\text{Kg}^\circ\text{C}} (0,3 - 34,3)^\circ\text{C}$$

$$Q = -1.162 \text{ Kcal}$$

Este Q Leche lo absorbe el refrigerante R-22

$$Q_{\text{Leche}} = (m_{R22}) \lambda (R22)_{25 \text{ psig}}$$

Entalpia. Cambio fase

$$\lambda_{R22} = h_{fg} = \frac{52,143 \text{ Kcal}}{\text{Kg}} \text{ (Kern, 1999)}$$

$$\rho_{\text{Leche}} (\text{a } 34,3 \text{ C}^\circ = 1.019,79 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}) \text{ (Amiot, 1991)}$$

Las propiedades térmicas de la leche se toman de: <http://rpaulsingh.com>

(a 15°C) (S.I. y S. INGLES)

$$K = 0,34 \frac{\text{BTU}}{\text{h pie}^\circ\text{F}}$$

$$C_p = 0,896 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}^\circ\text{C}}$$

$$C_p = 0,93 \frac{\text{BTU}}{\text{lbm}^\circ\text{F}}$$

Cálculo de Re: Número de Reynolds en el TK (TK = Tanque)

Rej = número de Reynolds para tanques con agitación enfriadas con serpentín.
(Kern, 1999)

$$Re_j = \frac{L^2 N \rho}{\mu}$$

L= Longitud del impeller (pies)

N= revoluciones por hora

ρ = densidad de la leche

μ = viscosidad de la leche

Se calcula entonces h_c :

De acuerdo a lo anterior, el coeficiente de transferencia de calor h_c para el tanque agitado en unidades del sistema inglés, es:

$$h_c = j \left(\frac{k}{Di} \right) \left(\frac{c^{\mu}/k} \right)^{-1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14}$$

Calor que entra al TK por convección y radiación, de las Ecuaciones. 10.7 a 10.10, (Kern, 1999)

$$h_{conv} = h_c = 0,3 \Delta t^{0.25}$$

Para calcular la LMTD se usa el método según Kern (1999). Caso fluido isotérmico representado en la Figura 8. (pues se evapora el refrigerante R22 y la evaporación es un cambio de fase, ocurriendo a presión y temperatura constante):

$$LMTD = \frac{\Delta T t_2 - \Delta t_1}{\ln \Delta \frac{t_2}{t_1}}$$

Ahora se calcula el Área de Transferencia de Calor, (es decir, el área necesaria para que el ETOH retire 5.215 BTU.)

$$Q_{TOTAL} = U_D A (LMTD)$$

$$A = \frac{Q_{TOTAL}}{A(LMTD)}$$

$$A = \frac{5.215}{42 * 24,1}$$

$$A = 5,2 \text{ pies}^2$$

Se requiere un área de 5,2 pies cuadrados para retirar 5.215 BTU en un tiempo estimado de una hora.

$$Acc (\text{Área cilindro concéntrico}) = \pi D_1 L + \pi D_2 L$$

$$Acc = \pi L (D_1 + D_2)$$

$$Acc = \pi * 1,54 (0,61 + 0,466)$$

$$Acc = 5,2 \text{ pies}^2$$

Sabiendo que el flujo volumetrico Q es:

$$Q = VA = V * \frac{\pi * (D)^2}{4}$$

Calculo Re_t = Número Reynolds en el tubo (serpentín), en contacto con el ETOH, según Figura 17.

$$Re_t = \frac{\rho V D}{\mu}$$

$$Q_{TOTAL} = Q_{LECHE} + Q_{ETOH}$$

Q_{TOTAL} debe ser absorbido por el R22

$$Q_{TOTAL} = 5.215 \text{ BTU} + 194,2 \text{ BTU}$$

$$Q_{TOTAL} = 5.409,2 \text{ BTU}$$

$$Q_{TOTAL} = 5.410 \text{ BTU}$$

$$Q_{TOTAL} = 5.410 \frac{\text{BTU}}{\text{h}} \quad (\text{B.C. 1 hora})$$

Ahora se calcula el serpentín necesario para transferir 5.410 BTU del ETOH al refrigerante R22.

$$Q_{TOTAL} = V_D A_s (LMTD) \quad \text{Donde } A_s = \text{área externa del serpentín}$$

$$\frac{Q_{TOTAL}}{V_D(LMTD)} = A_s$$

$$A_s = \frac{\frac{5.410 \text{ BTU}}{\text{h}}}{12.8 \frac{\text{BTU}}{\text{h} \cdot \text{pie}^2 \cdot \text{F}} * 47,81^\circ \text{F}}$$

$$A_s = 8,843 \text{ pies}^2$$

El serpentín debe ir dentro del ánulo:

Obsérvese que lo importante es cumplir con el área 8,843 pies² (0.822m²), por lo tanto el segundo serpentín puede ser de diámetro mayor o menor que ds= 14, 82375cm, lo importante es que se puedan acomodar los 28 m de tubería de 0,9525 cm (3/8") de diámetro puesto que esto hace parte de la ingeniería de construcción del sistema de transferencia de calor y no de su teoría.

Finalmente el sistema queda:

$$Q = 5.410 \frac{\text{BTU}}{\text{h}}$$

$$U_D = 12,8 \left(\frac{\text{BTU}}{\text{h} * \text{pie}^2 * \text{°F}} \right)$$

$$\text{LMTD} = 47,81 \text{°F}$$

$$D_s = 14,82375 \text{ cm} = 0,486 \text{ pies}$$

$$A_s = 8,43 \text{ pie}^2$$

$$N_s = 60 \text{ espiras (vueltas)}$$

$$LT = 92 \text{ pies (28m)}$$

$$dts = \frac{3}{8} \text{ pies} = 0,03125 \text{ pies} = 0,9525 \text{ cm}$$

$$\text{Espaciamiento entre las espiras} = R_i = 0,31 \text{ cm}$$

Dos serpentines con una altura de 28,6 cm (0,94 Pies) en doble hélice, por ejemplo:

Balance de Energía por 1ª Ley de la Termodinámica:

$$\overset{0}{q} + \overset{0}{h_1} + \overset{0}{\frac{\dot{v}_1}{2}} + \overset{0}{Z_{1s}} = \overset{0}{h_2} + \overset{0}{\frac{\dot{v}_2}{2}} + \overset{0}{Z_{2s}} + Wc$$

$$q = 0 \text{ (adiabático)}$$

$$h_1 = h_2 + Wc$$

Balance de Energía por 2ª Ley de la Termodinámica:

$$d_s = \frac{dQ}{T} \quad Q = 0 \quad T \neq 0$$

$$d_s = 0 \quad \rightarrow \quad \Delta S = 0 \quad \rightarrow \quad S_2 = S_1$$

Estos cálculos no tienen en cuenta la producción de entropía que es dominio de la Termodinámica de Procesos Irreversibles, más allá de los alcances de este trabajo de investigación.

Cálculo de otro parámetro muy importante llamado Capacidad:

$$\text{Capacidad} = \frac{\dot{m} \text{ Refrigerante } q_L}{(\text{Ton} * H_2O) \lambda H_2O}$$

Para el refrigerante R22

$$\text{Capacidad} = \frac{\dot{m} R_{22} q_L}{\frac{12.000 \text{ BTU}}{h}}$$

$$(\text{Ton} * H_2O) \lambda H_2O = \frac{\text{BTU refrigerante}}{h}$$

$$d_s = 0 \quad \rightarrow \quad \Delta S = 0 \quad \rightarrow \quad S_2 = S_1$$

3.3 ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO

Procedimentalmente se manejaron 02 tratamientos, T1 Leche cruda con proceso de refrigeración en posproducción y T2 Leche cruda con manejo posproducción a temperatura ambiente. Una vez encendido el equipo, se inicia a la par del proceso de refrigeración, el registro fotográfico de los acontecimientos por un lapso de 70 minutos (Tabla 3), tiempo en el cual la temperatura de la leche desciende de 34,3°C a 0,3°C (Gráfica 1). Adicionalmente se tomaron muestras de las leches para análisis microbiológicos de los dos tratamientos, antes del inicio de los experimentos y luego de la culminación del aporte frigorífico de manera sistemática durante más de 9 horas, cuyos resultados de laboratorio

demonstraron la eficacia de la funcionalidad del equipo de refrigeración de leche cruda en la cadena de frío.

Una vez tomadas las muestras lácteas en el sitio de validación del equipo de refrigeración en recipientes estériles y almacenadas en cadena de frío, fueron llevadas al laboratorio de calidad láctea de la Planta de Precondensación de la multinacional Nestlé, en la ciudad de Florencia. En el laboratorio se procedió a desarrollar el protocolo para la cuantificación de organismos mesófilos totales, a través del equipo BACTOSCAN FC50, el cual está diseñado para la determinación rápida y fiable completamente automatizada de la calidad higiénica de la leche cruda. Cuenta el número total de células individuales en una muestra láctea, reportando sus reportados en Unidades Formadoras de Colonias (UFC).

3.3.1 Procedimiento para la cuantificación de UFC/mL en muestras lácteas.

3.3.1.1 Preparaciones de arranque del BactoScan FC 50.

- Sustituir el filtro en el dispositivo de aspiración. Levantar el electrodisco de muelle que sostiene el filtro en su posición, remover el filtro viejo, insertar el filtro nuevo y soltar el disco.
- Sustituir el recipiente con solución de final del día con el recipiente con reactivo de incubación. Llenar los contenedores para líquido (volúmenes pueden variar según el número de muestras analizadas por día).

- Pronto para usar reactivo de incubación:
Si hay restos de solución del día anterior, solo pueden utilizarse mientras hayan permanecido en refrigeración, no mezclar con reactivo nuevo y no exceder más de un día de preparación.
- Pronto para usar líquido portador:
Remanentes del día anterior pueden usarse.
- Controlar el recipiente grande por lavado y llenar, si es necesario.
Remanentes del día anterior pueden usarse.
- Tomarse nota que todos los líquidos deberán tener una temperatura superior a 15°C al arrancar.
- Transferir las pipetas desde su sitio en la puerta del compartimiento hasta los recipientes correspondientes, tener cuidado de la pipeta correcta para cada líquido.

3.3.1.2 Procedimiento de arranque.

- Encender el equipo, el computador y el sistema de aire comprimido.
- Digite la clave correspondiente.
- Hacer clic en el ícono (Start Foss Integrator).
- El equipo se encuentra en el modo auto estar y completará su inicio a no ser que requiera una copia de seguridad, si es así proceda como sigue:
- Digite la clave (Manager), al pedirla el equipo.

- Seleccione Maintenance para continuar y luego > backup, > Start Backup, >OK, espere mientras el sistema completa la copia y cierre todas las ventanas hasta llegar al pantallazo inicial, donde puede elegir continuar.
- El sistema pide la clave de nuevo para confirmar (Manager).
- En la parte superior de la pantalla seleccione >OFFLINE.
- En este paso el equipo realiza un reconocimiento de la conexión de las partes mostrando un cuadro donde se sigue el procedimiento:
 ROJA: Indica que no hay contacto de comunicación con la unidad.
 AMARILLA: Indica que se ha establecido comunicación con la unidad
 VERDE: Indica que el software y los ajustes han sido enviados a la unidad para arranque.
- Crear una nueva sesión de trabajo (opcional).>File>Open, y elija como corresponda. Por lo general se elige la segunda opción para comenzar una nueva sesión.
- En la parte superior de la pantalla seleccione >STANBY; se enciende un aviso para que se verifique posición de las soluciones, si todo esta en su lugar>OK, Ahora se iniciarán los procedimientos automáticos de arranque, y el analizador se calentará y preparará el sistema de flujo con líquidos, en la parte inferior izquierda de la pantalla se muestran las advertencias y problemas que hay durante el arranque, seleccione con doble clic para maximizar la ventana, es conveniente que hayan desaparecido todas las alarmas para continuar.

- Luego del procedimiento anterior, el equipo está listo para iniciar su trabajo, pero antes verifique que se halla activado el símbolo de inicio en la parte superior de la pantalla.

3.3.1.3 Análisis de muestras.

Nota: No remover las pipetas de los recipientes de líquido, mientras el analizador está midiendo, ya que en tal caso el BactoScan FC50 se irá al modo espera, y los resultados podrán ser afectados.

Mientras tanto:

Preparar las muestras para la evaluación analítica del equipo:

*Blanco

*BCS


*PCS

Luego, realizar el siguiente procedimiento:

- Elija dando clic a la ventana new job, en la parte superior derecha de la pantalla y escoja el modo manual para pasar las muestras de chequeo.
- En tipo de trabajo elegir “aseguramiento de calidad” y dar clic en el trabajo específico a desarrollar (blank, bacterial control, muestras con partículas) automáticamente el nombre de la tarea es registrado.
- En la casilla “total” coloque el número mínimo de aspiraciones para la muestra a procesar, así: para blank (5), BCS (3), PCS (1).

- Dar clic en “same sample” para que las aspiraciones sean hechas de la misma muestra, así como también dar clic en “local job” y “add to jobilst”. Luego cierre esta ventana.
- Iniciar el análisis pulsando inicio, en este momento el analizador abre una ventana advirtiéndolo del cambio de filtro y la posición de líquidos, si está todo correcto, presione enter u OK sobre la ventana. El equipo se preparará para la secuencia de trabajo y al final pedirá que le coloque la muestra en cuestión debajo de la pipeta y pulsar ente Controlar los gráficos PHA para las muestras de control bacteriano, y que los resultados de las muestras de control bacteriano estén conformes con los límites especificados.

NOTA: Realizar el mismo procedimiento con las demás muestras de chequeo; estos resultados quedan registrados en el sistema pero es necesario llenar los documentos.

- Para el análisis de muestras (job type) normales, hacer clic en new job, escoger el modo automático para utilizar la banda transportadora, colocar el nombre de la tarea y el número total de muestras a procesar, de igual forma dar clic en “local job” y “add to jobilst”. Y el equipo estará listo para el análisis de las muestras solo pulsando: 
- Para realizar comentarios o colocar el nombre de la tarea, hacer doble clic frente a la tarea en la lista de resultados.

3.3.1.4 Procedimiento de cierre.

Luego de pasar la totalidad de las muestras el equipo se va al modo espera realizar el procedimiento siguiente:

1. Sustituir la botella con el reactivo de incubación en el carrito con un recipiente con solución de final del día. Colocar las pipetas en el recipiente de final del día. Tomarse nota que la solución de final del día deberá tener una temperatura superior a 15°C.
2. Transferir resultados de análisis a sistemas externos, si hace falta.
3. Ir al modo detener, hacer clic.
4. Limpiar la cinta y las partes circundantes.
5. Luego de terminar el proceso de limpieza, dar clic sobre el icono "ONLINE" en la parte superior de la pantalla, para ir al modo offline.
6. Cerrar y purgar el sistema de aire comprimido.
7. Apagar equipo.

4. RESULTADOS. PRUEBA DE FUNCIONALIDAD

4.1 DESARROLLO DE CÁLCULOS DE DISEÑO

El diseño del equipo para refrigerar 36 L de leche desde 34,3°C hasta 0,3°C, en su conjunto todo el sistema debe ubicarse dentro de una cantina comercial donde se transporta la leche. En las Figura 1 y 2 se presenta un esquema de la sección transversal del tanque y el sistema de agitación.

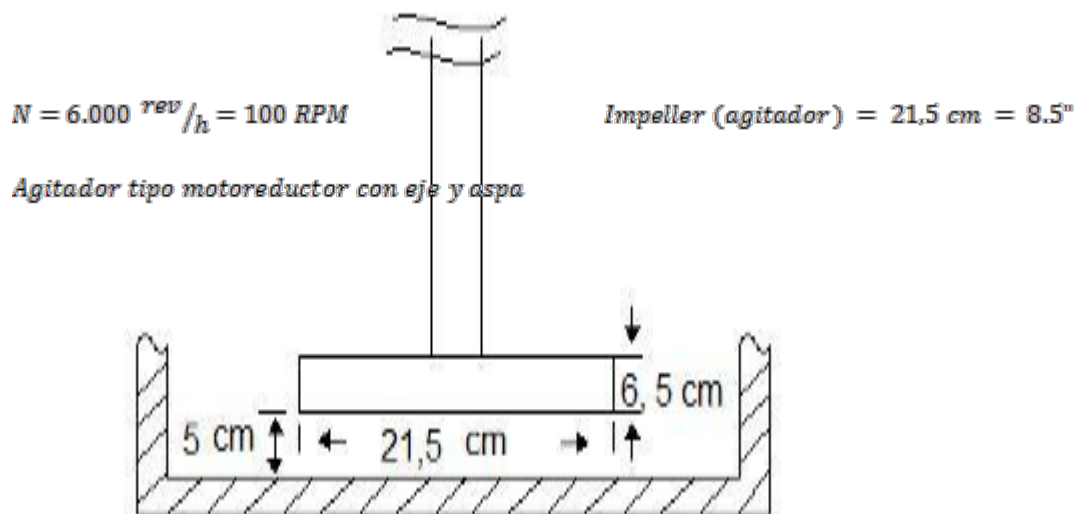
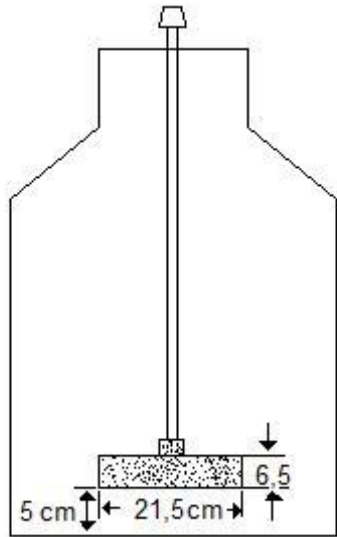


Figura 1. Sección transversal de fondo tanque Isothermo. Fuente: Autor



$$Q_{\text{leche}} = V_{\text{leche}} \rho_{\text{leche}} C_{p \text{leche}} \Delta T^{\circ} \text{leche}$$

$$Q_{\text{leche}} = V \rho C_p \Delta T^{\circ}$$

$$Q_{\text{leche}} = 36L * \frac{1.032 \text{ Kg}}{L} * \frac{0,92 \text{ Kcal}}{\text{Kg}^{\circ}\text{C}} (0,3 - 34,3)^{\circ}\text{C}$$

Figura 2. Sistema de agitación del tanque isoterma. Fuente: Autor

$Q_{\text{Leche}} = - 1.162,12 \text{ Kcal}$ quiere decir que este es el calor que hay que retirar para enfriar la leche.

$$Q_{\text{retirado de la Leche}} = - 1.162,12 \text{ Kcal}$$

$$1.162,12 \text{ Kcal} * \frac{4185 \text{ J}}{\text{Kcal}}$$

$$Q_{\text{Leche}} = -4.863.449,43 \text{ J}$$

$$Q_{\text{Leche}} = -5 \text{ MJ} \text{ (calor que debe retirar el equipo de intercambio de calor)}$$

Este Q_{Leche} lo absorbe el refrigerante R-22

$$Q_{\text{Leche}} = m_{R_{22}} \lambda_{R_{22}} |_{25 \text{ psig}}$$

Del diagrama P-H del refrigerante R22 del lado del evaporador (por lo tanto se supone vapor saturado a 25 Psig)

$$\text{sat} = 17,2 \text{ C}^{\circ}$$

Los cambios de fase son a presión y temperatura constante, por lo tanto se trata de un fluido de enfriamiento isotérmico, como se evidencia en la Figura 3.

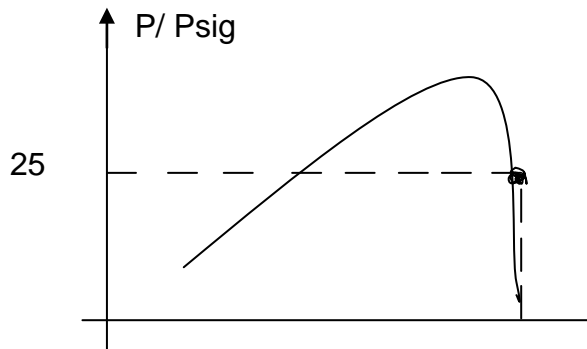


Figura 3. Cambio de fase de refrigerante. Fuente: Autor

Entalpia. Cambio fase

$$\lambda_{R22} = h_{fg} = 52,143 \text{ Kcal/Kg (Kern, 1999)}$$

$$\lambda_{R22} \left[\frac{25 \text{ psig}}{-17,2 \text{ C}^\circ} = \frac{218.219 \text{ J}}{\text{Kg}} \right]$$

$$m_{R22} = \frac{Q_{\text{leche}}}{\lambda_{R22}} = \frac{5 * 10^6 \text{ J}}{\frac{218219 \text{ J}}{\text{Kg}}}$$

$$m_{R22} = 25,21 \text{ Kg R22}$$

$$m_{R22} = 25,2197358 \text{ Kg}$$

El cálculo del Número de Reynolds para recipientes con agitación, se hace de acuerdo con (Kern, 1999):

$$\rho_{\text{Leche}} |_{34,3 \text{ C}^\circ} = 1.019,79 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \text{ (Amiot, 1991)}$$

$$L = 0.215 \text{ m (Dimensión aspa agitadora)}$$

$$N = 100 \text{ rpm} = 6.000 \text{ revoluciones/hora}$$

$$K = 0.581 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$\mu = 2,1 \text{ Cp} = 0,0021 * \frac{\text{lbm}}{\text{m} * \text{s}}$$

Sobre una composición de la leche:

H ₂ O	88,00 g
Proteína	3,20 g
Grasa	3,40 g
CH	4,70 g
Minerales	0,70 g
	<u>100,00 g</u>

$$\rho \text{ Leche } 34,1^\circ\text{C} = 1.019,8 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} = \frac{\text{lbm}}{\text{pie}^3}$$

Las propiedades térmicas de la leche se toman a 15°C (S.I. y S. INGLES)

$$K = 0,34 \frac{\text{BTU}}{\text{h pie}^\circ\text{F}}$$

$$Cp = 0,896 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}^\circ\text{C}}$$

$$Cp = 0,93 \frac{\text{BTU}}{\text{lbm}^\circ\text{F}}$$

$$\mu = 2,1 \text{ Cp}$$

$$1 \text{ Cp} = 2,42 \frac{\text{lb}}{(\text{pie h})}$$

$$0,45 \text{ Cp} * 2,42 \frac{\text{lb}}{(\text{pie h})}$$

$$\frac{\text{lb}}{\text{Cp}}$$

$$0,581 \frac{\text{WJ}}{\text{s m}^\circ\text{C}} \times \frac{1^\circ\text{C}}{1,8^\circ\text{F}} \times \frac{0,3048 \text{ M}}{1 \text{ pie}} \times \frac{3.600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \times \frac{1 \text{ BUT}}{1.055 \text{ J}} = \frac{0,34 \text{ BTU}}{\text{h pie}^\circ\text{F}}$$

$m_{R22} = 510 \text{ g}$, entonces:

$$\frac{25,21 \text{ Kg R22}}{0,510 \text{ Kg R22}} = 49,49 \text{ ciclos}$$

$$L = \frac{8,5''}{12} = 0,71 \text{ pies}$$

$$L = 0,71 \text{ pies}$$

Cálculo de Re: Número de Reynolds en el TK (TK = Tanque)

Rej = número de Reynolds para tanques con agitación enfriadas con serpentín.
(Kern, 1999)

$$Rej = \frac{L^2 N \rho}{\mu}$$

L= Longitud del impeller (pies)

N= revoluciones por hora

ρ = densidad de la leche

μ = viscosidad de la leche

$$Rej = \frac{(0,71)^2 \times 6000 \frac{rev}{h} \times 63,66 \frac{lbm}{h}}{5,08 \frac{lbm}{(pie)}}$$

$$Rej = 37.902,76 \approx \frac{L^2 N \rho}{\mu}$$

$$Rej = 37.902,76 \approx 38.000$$

$Rej = 38.000$ Flujo turbulento

Ahora se calcula J = factor para transferencia del calor (adimensional)

$$J = 700 \text{ (Figura 20.2 Kern, 1999)}$$

Ahora se calcula h= coeficiente de transferencia de calor del lado de la leche

$$h [=] \frac{BUT}{Pie^2 h^\circ F leche}$$

$$h [=] \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

$$J = \frac{hcDj}{K} \left[\frac{Cp \mu}{k} \right]^{1/3} \left[\frac{\mu}{\mu_w} \right]$$

μ_w = Viscosidad de la leche en la pared del tubo que contiene el alcohol industrial. La leche tiene un alto porcentaje de agua aproximadamente del 88.7%, por lo tanto sus propiedades se pueden aproximar a las del agua:

μ_w

$$\left[\frac{\mu}{\mu_w} \right] \text{ Leche} = 1.0$$

$$Dj = \frac{ID TK}{12} = \frac{\text{diámetro interno de TK}}{12 \text{ (para pasar de pulgadas a pies)}}$$

Diámetro TK = 38.5 cm (Fig. 1)

38,5 cm – 0,7 cm (3,5mm es el espesor de la pared del TK)

$$ID TK = 37,8 \text{ cm} = \frac{1''}{2,54 \text{ cm}}$$

ID TK = 15,2''

$$Dj = \frac{15,2}{12} = 1,24 \text{ pies}$$

Dj = 1,24 pies

Se calcula entonces hc :

De acuerdo a lo anterior, el coeficiente de transferencia de calor hc para el tanque agitado en unidades del sistema inglés, es:

$$hc = j \left(\frac{k}{Di} \right) \left(\frac{c^{\mu}}{k} \right)^{-1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14}$$

$$hc = 700 \left[\frac{0,34}{1,24} \right] \left[\frac{(0,93 = 5,08)}{0,34} \right]^{1/3}$$

$$hc = 461,4 \frac{BTU}{h \text{ pie}^2 \text{ } ^\circ F}$$

Ahora, hoy = coeficiente de transferencia de calor externo referido al área interna del lado del ETOH industrial (ETOH = Alcohol Etílico), como se evidencia en las Figuras 4 y 5, en donde se aprecia un corte longitudinal del evaporador y del serpentín de cobre.

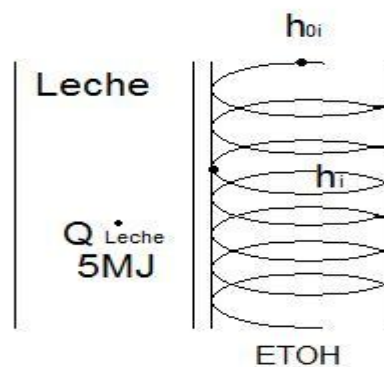


Figura 4. Puntos de transferencia de calor del ETOH. Fuente: Autor

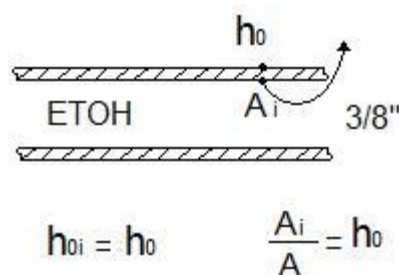


Figura 5. Transferencia de calor en el serpentín. Fuente: Autor

Del lado del ETOH no se puede aplicar el procedimiento anterior para calcular hoy, porque no hay movimiento de este (el alcohol permanece estático) y la

transmisión de calor ocurre por convección libre; Usando la metodología de cálculo descrita por Kern (1999).

$$\frac{\Delta}{d_o} = \frac{(\text{Temperatura de entrada de la leche} - \text{Temperatura del ETOH})}{\text{Diámetro externo en pulgadas}}$$

$$^{\circ}\text{C} = \left[\frac{^{\circ}\text{F} - 32}{1,8} \right]$$

$$1,8^{\circ}\text{C} + 32 = ^{\circ}\text{F} \text{ (Sistema Inglés)}$$

$$\text{Temperatura de la Leche} = 34,3^{\circ}\text{C} = 93,74^{\circ}\text{F}$$

$$\text{Temperatura del ETOH} = 3 - 0,1^{\circ}\text{C} = 31,82^{\circ}\text{F}$$

$$d_o = 0,9525 \text{ cm diámetro interno tubería de cobre } \frac{3}{8}'' \text{ (serpentín)}$$

$$d_o = 0,9525 \text{ cm diámetro interno tubería de cobre } \frac{3}{8}'' \text{ (serpentín)}$$

$$d_o = 0,9525 \text{ cm} * \frac{1 \text{ plg}}{2,54 \text{ cm}} = 0,375''$$

$$\frac{\Delta}{d_o} = \frac{(93,74 - 31,82)}{0,375''} = \frac{165,12^{\circ}\text{F}}{\text{Pulg}}$$

$$\frac{\Delta}{d_o} = \frac{165,12^{\circ}\text{F}}{\text{Pulg}}$$

$$tf = \frac{(t_w + t_a)}{2} = \frac{(-0,1 + 34,3)}{2}$$

$$tf = 17,1^{\circ}\text{C} \quad tf = 62,78^{\circ}\text{F}$$

$$\frac{\Delta}{d_o} = \frac{165,2^{\circ}\text{F}}{\text{Pulg}}$$

$$t_f = 62,78^\circ F$$

Estos dos grados de libertad se ubican en la figura 10.4 según: KERN, 1999. P. 260, se lee entonces:

$$h_i = 60 \frac{BTU}{h} * pie^2 * ^\circ F$$

Ahora se calcula U_c = Coeficiente Global de Transferencia de Calor Limpio (C= clean)

$$U_c = \frac{(h_c * h_{io})}{(h_c + h_{io})}$$

$$U_c = \frac{(461,4 * 60)}{(60 + 461,4)}$$

$$U_c = \frac{53,1 BTU}{(h \cdot pie^2 \cdot ^\circ F)}$$

Tomando R_d como factor de obstrucción ($h \cdot pie^2 \cdot ^\circ F / BTU$) que tiene en cuenta la pérdida de transferencia de calor por deposición de impurezas y mugre (incrustaciones). $R_d = 0,005 \frac{h \cdot pie^2 \cdot ^\circ F}{BTU}$ garantiza como mínimo un año de limpieza y aun continua operando bajo su condición de diseño. (Kern, 1999)

Ahora se Calcula U_D = Coeficiente Global de Transferencia de Calor de Diseño (D = Desing).

$$U_D = \frac{(U_c * 1/R_d)}{U_c + 1/R_d}$$

$$\frac{1}{R_d} = \frac{1}{0,005} = \frac{200 BTU}{(h \cdot pie^2 \cdot ^\circ F)}$$

$$U_D = \left(\frac{53,1 * 200}{53,1 + 200} \right)$$

$$UD = \left(\frac{42 \text{ BTU}}{h \text{ pie}^2 \text{ } ^\circ F} \right)$$

Cálculo del Área de Transferencia de Calor, Ecuación de Fourier $Q = (U A \Delta t)$.
 El ETOH debe absorber el calor necesario para refrigerar la leche ($5 \times 10^6 \text{ J}$) y el calor que genera el TK debido a la convección libre y a la radiación del medio ambiente, por lo tanto se debe calcular cuánto calor se transfiere de la atmosfera al TK, representado en la Figura 6, en donde se aprecian las fuentes de calor externas.

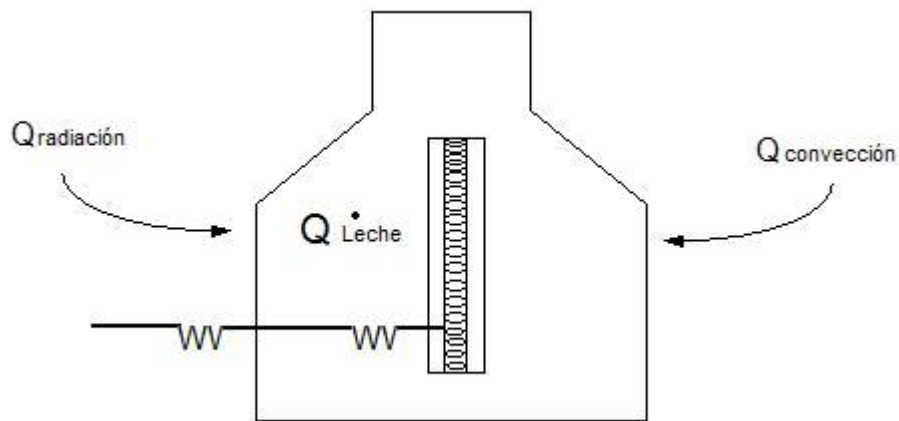


Figura 6. Transferencia de calor por radiación y convección. Fuente: Autor

$$Q \text{ Leche} = 5 \times 10^6 \text{ J (ya calculado)}$$

$$Q \text{ radiación} = ?$$

$$Q \text{ convección} = ?$$

Calor que entra al TK por convección y radiación, de las Ecuaciones. 10.7 a 10.10, (Kern, 1999)

$$h \text{ conv} = hc = 0,3 \Delta t^{0,25}$$

Dado que esta ecuación da el valor más alto de hc

$$25^{\circ}\text{C} - 3,3^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t = 77^{\circ}\text{F} - 37,94^{\circ}\text{F} = 39,06^{\circ}\text{F}$$

$$hc = 0,3 (39,06^{0,25}) = 0,75$$

$$hc = 0,75 \frac{BTU}{h * pie^{2} * F}$$

Razón de radiación.

$$hr = \frac{0,173 e \left(\frac{T_1 abs}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2 abs}{100} \right)^4}{T_1 abs - T_2 abs}$$

$$T_1 abs = \text{Temperatura alta absoluta} = ^{\circ}\text{F} + 460$$

$$T_2 abs = \text{Temperatura alta absoluta} = ^{\circ}\text{F} + 460$$

$e = \text{emisividad}$ (Kern, 1999)

$$T_1 abs = 77 + 460 = 537^{\circ}\text{R}$$

$$T_2 abs = 37,94 + 460 = 497,94^{\circ}\text{R}$$

$$e = 0,8$$

$$hr = 0,173 * \frac{0,8 \left(\frac{537}{100} \right)^4 - \left(\frac{497,94}{100} \right)^4}{537 - 497,94}$$

$$hr = 0,77 \frac{BTU}{h * pie^{2} * F}$$

Pérdidas combinadas

$$h_c + h_r = 0,75 + 0,77 = \frac{1,52 \text{ BTU}}{h * \text{pie}^{2\circ F}}$$

$$\text{Pérdidas combinadas} = 1,52 \frac{\text{BTU}}{h * \text{pie}^{2\circ F}}$$

Ahora, si se conoce el área y Δt se puede conocer el calor que fluye del medio ambiente. Teniendo en cuenta que el TK es un cilindro de 63 cm de alto por 33 cm de diámetro (caneca comercial de 40 L, donde se colecta y transporta la leche en el Departamento del Caquetá, ver Figura 7)

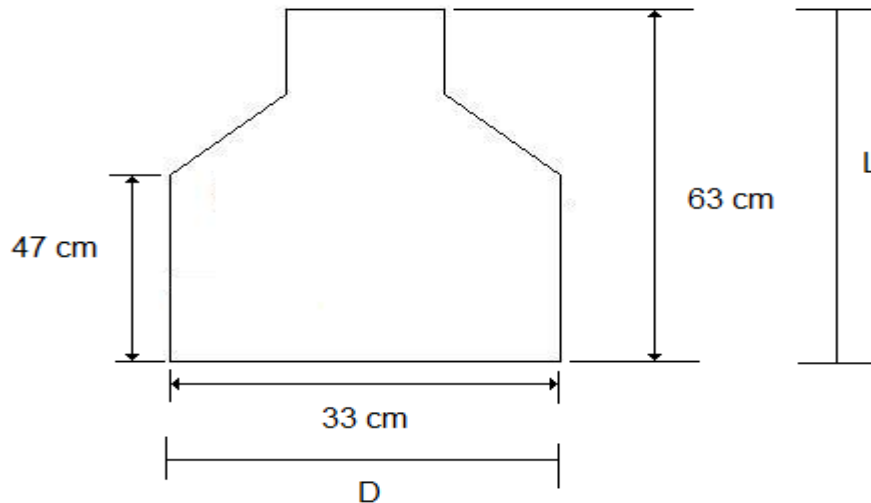


Figura 7. Medidas externas del tanque isoterma. Fuente Autor

$$A_{TK} = 2\pi RL + \frac{\pi}{4} D^2$$

(cuerpo) (tapa)

$$A_{TK} = 2\pi \left(\frac{D}{2}\right)L + \frac{\pi}{4} D^2$$

$$A_{TK} = 33\pi \left(L + \frac{D}{4}\right)$$

$$A_{TK} = 33\pi \left(63 + \frac{33^2}{4}\right)$$

$$A_{TK} = 34.756,22 \text{ cm}^2 \times \left(\frac{1 \text{ pie}}{30,48 \text{ cm}} \right)^2$$

$$A_{TK} = 7,95 \text{ pies}^2 - 8 \text{ pies}^2$$

$$A_{TK} = 8 \text{ pies}^2$$

$$\text{Calor total que fluye del entorno} = (hc + hr)(\Delta t) * A$$

$$\text{Calor total} = 0,52 \frac{\text{BTU}}{\text{h} * \text{pie}^2 \text{ } ^\circ\text{F}} * 39,06 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$\text{Calor total} = 474,96 \frac{\text{BTU}}{\text{h}}$$

$$\text{Calor total} = 475 \frac{\text{BTU}}{\text{h}}$$

$$\text{Base de Cálculo Temporal (BCT)} = 1 \text{ h}$$

$$\text{Calor total (Q de convección + Q de radiación)} = 475 \text{ BTU}$$

$$Q \text{ total} = Q \text{ Leche} + Q \text{ convección} + Q \text{ radiación}$$

$$Q \text{ total} = \frac{5 \times 10^6}{1.055} + 475 \text{ BTU}$$

$$Q \text{ total} = 5.215 \text{ BTU}$$

Ya se conoce Q TOTAL y UD, falta $\Delta t = \text{LMTD} = \text{Diferencia de Temperatura Media Logarítmica}$. Para calcular la LMTD se usa el método según Kern (1999). Caso fluido isotérmico representado en la Figura 8. (pues se evapora el refrigerante R22 y la evaporación es un cambio de fase, ocurriendo a presión y temperatura constante):

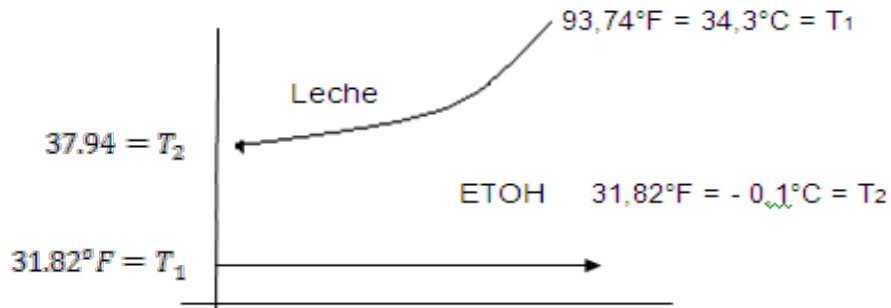


Figura 8. Curvas para determinar LMTD. Fuente: Autor

$$LMTD = \frac{\Delta T t_2 - \Delta t_1}{\ln \Delta \frac{t_2}{t_1}}$$

$$\Delta t_2 = T_1 - t_2 = 93,74 - 31,82 = 61,92^\circ F$$

$$\Delta t_1 = T_2 - t_1 = 37,94 - 31,82 = 6,12^\circ F$$

$$LMTD = \frac{61,92 - 6,12}{\ln \frac{61,92}{6,12}}$$

$$LMTD = 24,1^\circ F = -4,4^\circ C$$

Ahora se calcula el Área de Transferencia de Calor, (es decir, el área necesaria para que el ETOH retire 5.215 BTU.)

$$Q \text{ TOTAL} = U_D A (LMTD)$$

$$A = \frac{Q \text{ TOTAL}}{A (LMTD)}$$

$$A = \frac{5.215}{42 * 24,1}$$

$$A = 5,2 \text{ pies}^2$$

Se requiere un área de 5,2 pies cuadrados para retirar 5.215 BTU en un tiempo estimado de una hora.

Diseño del sistema de enfriamiento, sujeto a:

1. La altura del difusor debe ser menor o igual que 47 cm = 1.54 pies.
2. Diámetro menor que 25cm = 0,82 pies (para que pueda entrar el sistema de difusión (evaporador))
3. Desplazar menos del 10%.

$$A = \pi DL \quad V = \frac{\pi}{4} D^2 L$$

Si se usa toda la altura disponible $L = 47 \text{ cm} = 1.54 \text{ pies}$ de diámetro sería 0.82 pies = 25 cm.

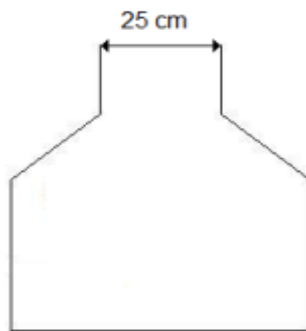


Figura 9. Medidas de abertura superior del tanque isoterma. Fuente: Autor

$$D = \frac{A}{\pi L}$$

$$D = 1,1 \text{ pies} \gg DTK$$

Para lograr el área de transferencia de calor requerida en el subsistema de evaporación (en contacto con la leche), se necesita que el diámetro de la boca de la cantina sea de 1,1 pies, cuando el ofertado es de 0,82 = 25 cm (cantina comercial, Figura 9). Como alternativa se procede a usar un ánulo (cilindros concéntricos) para lograr más área en el mismo espacio, como se detalla en las Figuras 10 y 11, en vistas frontales y superior del mismo.

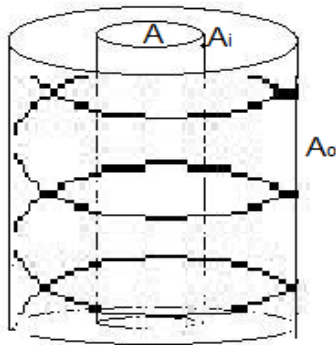


Figura 10. Representación ánulo. Fuente: Autor

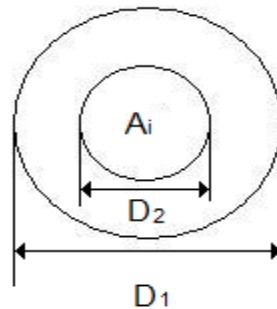


Figura 11. Vista superior ánulo en el evaporador (difusor). Fuente: Autor

$$5,2 \text{ pies} = \sqrt[4]{D_2 L}$$

$$\text{Si } L = 1,54 \text{ pies}$$

$$1.0748 = D_1 + D_2 \text{ (Ecuación No.1)}$$

$$\text{Volument del anulo} = L \sqrt[4]{\frac{1}{4} (D^2_1 - D^2_2)} = 0,1 V$$

$$V \text{ cilindro} = \sqrt[4]{\frac{1}{4} D^2 L}$$

V que desplaza:

$$V_{TK} = \sqrt[4]{\frac{1}{4} D^2 L} = \sqrt[4]{\frac{1}{4} (1,1)^2 (1,54)}$$

$$D = 38,5 \text{ cm} - \left(2 * 3,5 \text{ mm} * \frac{1 \text{ cm}}{10 \text{ mm}} \right) \quad \text{Nota: } 3,5 \text{ mm espesor pared TK}$$

$$D = 37,8 \text{ cm} = 1,24 \text{ pies}$$

$$L = 64 \text{ cm} = 1,24 \text{ pies}$$

$$V_{TK} = \frac{\pi}{4} (1,24 \text{ pies}^2)(2,1 \text{ pies}) = 2,536 \text{ pies}^3$$

$$V_{TK} = 2,536 \text{ pies}^3$$

El sistema de transferencia el calor debe desplazar el 10% de este volumen, o sea 0,2536 pies³

V desplazado por el ánulo:

$$A = \frac{\pi}{4} (D^2_2 - D^2_1)$$

V desplazado Sistema de Transferencia de Calor: Para lo cual es necesario determinar el diámetro y longitud del evaporador (Figuras 12 y 13).

$$Vd = \frac{\pi}{4} (D^2_1 - D^2_2)$$

$$Vd = 0,1 V_{TK}$$

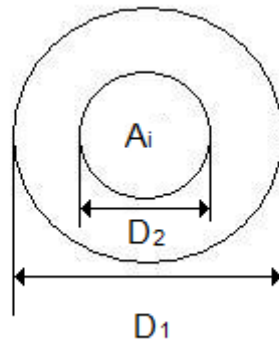


Figura 12. Diámetros externo e interno del evaporador. Fuente: Autor

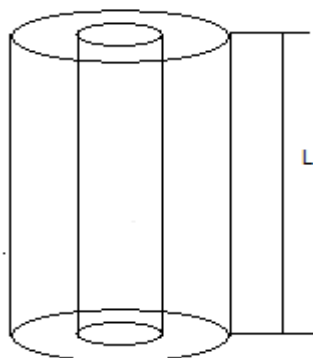


Figura 13. Longitud del evaporador. Fuente: Autor

$$0,2536 = \frac{\pi}{4} * 2,1 (D_1^2 - D_2^2)$$

$$0,15376 = D_1 - D_2 \text{ (Ecuación 2)}$$

$$1,0748 = D_1 - D_2 \text{ (Ecuación 1)}$$

$$D_1 = 1,0748 - D_2 \text{ (Ecuación 3)}$$

Ecuación 3 en 2

$$0,15376 = (1,0748 - D_2)^2 - D_2^2$$

$$(a - b)^2 = a - 2ab + b^2$$

$$0,15376 = 1,155 - 2(1,0748D_2) + D_2^2 - D_2^2$$

$$D_2 = 0,466 \text{ pies} = 14,2 \text{ cm}$$

$$D_1 = 0,61 \text{ pies} = 18,6 \text{ cm}$$

Entonces el Sistema de Transferencia de Calor queda constituido por un cilindro concéntrico de 18,6 cm de diámetro y 47 cm de longitud, con boquillas de entrada y salida del refrigerante R22, como se aprecia en las Figuras 14 y 15.

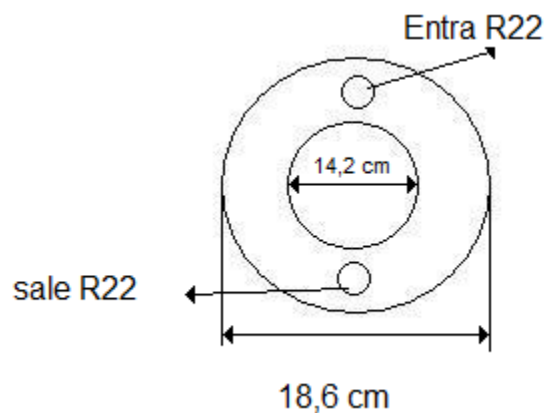


Figura 14. Ubicación puntos de entrada y salida refrigerante R22. Fuente: Autor

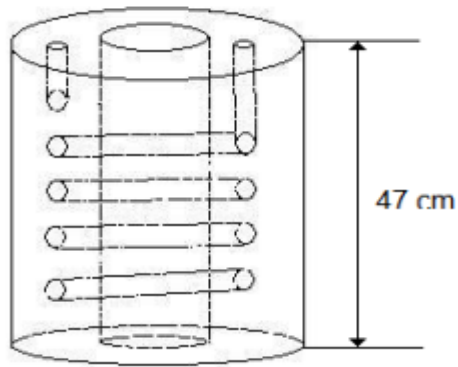


Figura 15. Disposición de la espiral de cobre en el evaporador. Fuente: Autor.

$$Acc \text{ (Área cilindro concéntrico)} = \pi D_1 L + \pi D_2 L$$

$$Acc = \pi L (D_1 + D_2)$$

$$Acc = \pi * 1,54 (0,61 + 0,466)$$

$$Acc = 5,2 \text{ pies}^2$$

Ahora se diseña el serpentín del evaporador que sea capaz de refrigerar al ETOH hasta $-0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ ($31,82 \text{ }^\circ\text{F}$). Ver figura 16.

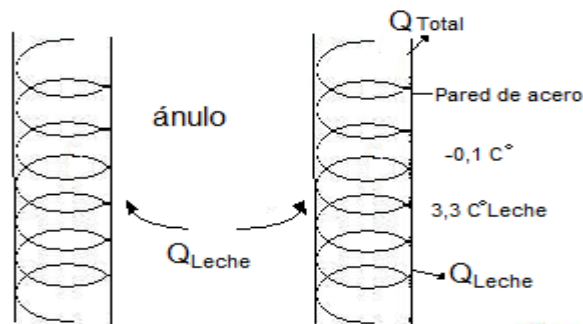


Figura 16. Disposición de serpentín (corte longitudinal). Fuente: Autor

$$\mu_{R22} = 12,56 \mu \text{ Pa} * s \text{ a } 0^\circ\text{C}$$

$\rho_{R22} = 3 \text{ veces la del aire}$

$\rho_{R22} = 2 \text{ veces la del agua líquida}$

$\rho_{R22} = \text{líquido a } -41^\circ\text{C}$

$\mu_{R22} = 0,0127 \text{ mPa} \cdot \text{s}$

$$K_{R22 \text{ vapor}} = 0,0113 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{K}}$$

$$\lambda_{R22} = 23,95 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$\rho_{R22} = 4,706 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} (\text{vapor})$$

$$C_p = 0,057 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}^\circ\text{K}} \quad (\text{a } 30^\circ\text{C y } 1 \text{ atm})$$

$$m_{R22} = 86,48 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$0,57 \frac{\text{KJ}}{\text{Mol}^\circ\text{K}} * \frac{1 \text{ mol}}{86,48 \text{ g}} * \frac{1.000 \text{ g}}{1 \text{ Kg}}$$

$\mu_{R22} = 0,0001256 \text{ poise} = 0,01 \text{ cp}$

$$12000 \frac{\text{BTU}}{\text{h}} = 1 \text{ ton refrigeración}$$

$$12000 \frac{\text{BTU}}{\text{h}} = 3.000 \text{ frigorias/h}$$

$Ret \text{ (Reynolds en el tubo del serpentín)} = \frac{DGt}{\mu}$

$$At = \frac{\uparrow}{4(0,02051)^2} = 3,302 \times 10 * 4 \text{ pies}^2$$

$$22,9 \frac{\text{Kg R22}}{60 \text{ min}} * \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} * \frac{2,205 \text{ lbm}}{1 \text{ Kg}}$$

$$40,49 \frac{\text{lbm}}{\text{h}}$$

La Carga Real es 510g/ (453g /lb masa) = 1,125 lbm de R22, entonces:

$$50,49 \frac{\text{h}}{\text{lbm R22}} * 1,125 \text{ lbm R22} = 55,6 \text{ lbm R22}$$

En 1h logra retirar $5,5 \times 10^6$ J (5.215 BTU)

Cuanto calor absorbe 1,125 lbm R22?

$218.219 \text{ J/Kg} * 0.51 \text{ Kg} = 111.292 \text{ J}$ en cada ciclo. Tiene que hacer 49,4 ciclos ≈ 50 ciclos / 1h = 0,8224 ciclos/min.

Sabiendo que el flujo volumétrico Q es:

$$Q = VA = V * \frac{\pi * (D)^2}{4}$$

Y que $\dot{m} = \rho * V * A = \rho * Q$, Se tiene que:

$$Q = V * A = V * \frac{\pi * (D)^2}{4}$$

$$\frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{V\pi}{4(D)^2}$$

$$V = \frac{4\dot{m}}{\pi\rho(D)^2}$$

$$Re_t = \rho \frac{VD}{\mu}$$

$$\dot{m} = \frac{25,24 \text{ Kg R22}}{3.000} = 7 \times 10^{-3} \frac{\text{Kg}}{\text{S}}$$

$$\dot{m}_{R22} = 7 \times 10^{-3} \frac{\text{Kg}}{\text{S}}$$

$$D^2 = \left(0,625 \text{ cm} \times \frac{1\text{m}}{100\text{cm}} \right)^2$$

$$D_t^2 = 3.90625 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$\rho_{R22} = 4.706 \text{ kg/m}^3$$

$$V = \frac{4 * 7 * 10^{-3}}{\pi * 3,9625 * 10^{-5} * 4.709}$$

$$\text{Velocidad del R22} = 48,5 \text{ m/s}$$

Calculo Re_t = Número Reynolds en el tubo (serpentín), en contacto con el ETOH, según Figura 17.

$$Re_t = \frac{\rho V D}{\mu}$$

$$\rho = 4,706 \text{ Kg/L}$$

$$V = 48,5 \text{ m/s}$$

$$D = 6,25 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$\mu = 1,27 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$Re_t = \frac{4,706 * 48,5 * 6,25 \times 10^{-3}}{1,27 \times 10^{-5}}$$

$Re_t = 112.323,3$ Turbulencia total. Kern, 1999.

$$Jh = 250 \text{ (adimensional)} \quad JH = \frac{Nv^\alpha}{Pr^\beta}$$

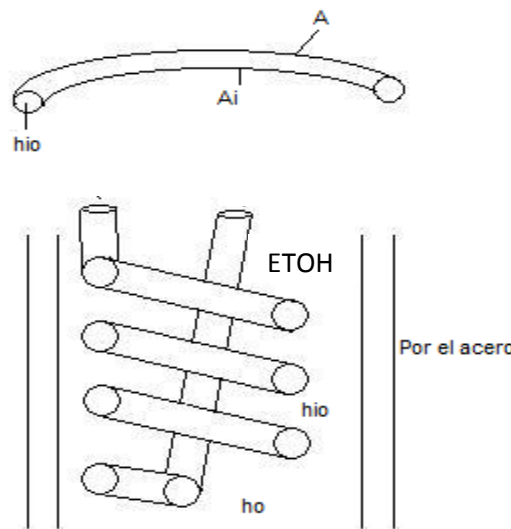


Figura 17. Representación ETOH en el evaporador. Fuente: Autor

Tomando una sección del tubo del serpentín, según Figura 18:

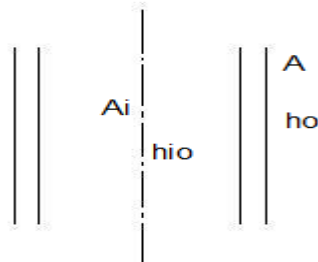


Figura 18. Sección de tubería del serpentín. Fuente: Autor

Calculo h_i (dentro del serpentín, o sea para el refrigerante R22)

$$h_i = Jh K/D \left(C \frac{\mu}{K} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0,14} \quad 1,0 \text{ Fluido Evaporante } \mu = CTE, \text{ Porque } T^\circ = CTE$$

$$Jh = 250$$

$$K = 0,013 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \quad (\text{Paso al sistema inglés})$$

$$\frac{0,0113 J}{s \cdot m^2 \cdot ^\circ C} \times \frac{1 BTU}{1.055 J} \times \frac{3.600 s}{1 h} \times \frac{1^\circ C}{1,8^\circ F} \times \frac{0,3048 m}{1 pie}$$

$$K = 2 \times 10^{-3} \frac{BTU}{h \text{ pie}^2 \cdot ^\circ F}$$

$$C = \frac{0,057 KJ}{mol \cdot K} * \frac{1 K}{1,8^\circ R} * \frac{1^\circ R}{1^\circ F} * \frac{1.000 J}{KJ} * \frac{1 BTU}{1.055 J} * \frac{1 mol}{86,48 g} * \frac{453 g}{lbm}$$

$$C = 0,1572 \frac{BTU}{lbm \cdot ^\circ F}$$

$$D = 0,625 \text{ cm} \times \frac{1}{30,48 \text{ cm}}$$

$$D = 0,02051 \text{ pies}$$

$$\mu = 0,0307 \frac{lbm}{pie \cdot h}$$

$$h_i = 250 \left(\frac{2 \times 10^{-3}}{0,02051} \right) \left(\frac{0,1572 \times 0,0307}{2 \times 10^{-3}} \right)^{1/3}$$

$$h_i = 32,7 \frac{BTU}{h * pie^{2 \circ F}}$$

Se corrige porque este valor de h_i es dentro del tubo de 3/8", pero la transferencia ocurre por el área externa (\emptyset externo del tubo de cobre, quien hace las veces de serpentín = 0,9525 cm)

$$h_{io} = h_i \frac{A_i}{A} = h_i \frac{D_{int}}{D_{ext}}$$

$$h_{co} = 32,7 \frac{0,625}{0,9525}$$

$$h_{co} = 21,5 \frac{BTU}{h * pie^{2 \circ F}}$$

$$R_d = 0,005 \frac{h * pie^{2 \circ F}}{BTU}$$

$$U_c = \frac{h_o * h_{io}}{h_o + h_{io}}$$

$$U_c = (60 * 21,5) / (60 + 21,5)$$

$$U_c = 15,83 \frac{BTU}{h * pie^{2 \circ F}}$$

$$U_D = 15,83 \frac{V_c \frac{1}{R_d}}{V_c + \frac{1}{R_d}} \left(\frac{1}{R_d} = 75 \right)$$

$$R_d = 0,015 \frac{h * pie^{2 \circ F}}{BTU}$$

$$U_D = \frac{1,83 \left(\frac{1}{0,015} \right)}{15,38 + \frac{1}{0,015}}$$

$$U_D = 12,8 \frac{BTU}{h * pie^2 * ^\circ F}$$

Para el cálculo de LMTD, se grafican las curvas de T° del ETOH y el refrigerante R22, según la siguiente Figura.

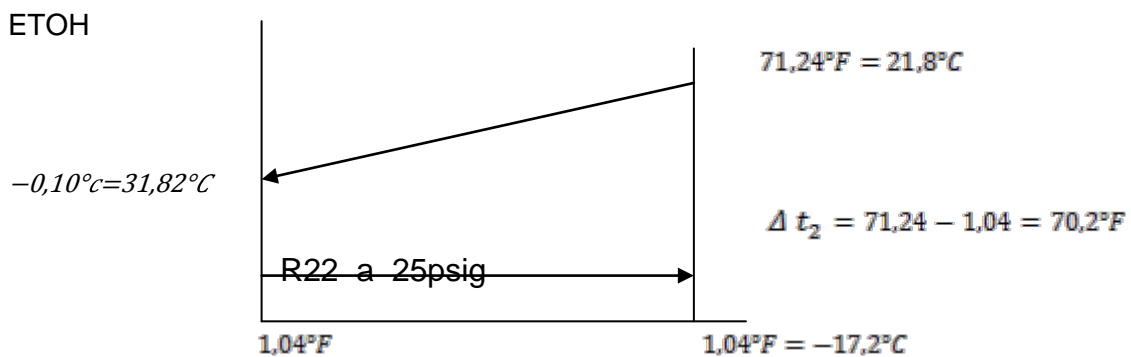


Figura 19. Curvas para cálculo LMTD (ETOH/R22). Fuente: Autor

$$\Delta t_2 = 71,24 - 1,04 = 70,2^\circ F$$

$$\Delta t_1 = 31,82 - 1,04 = 30,78^\circ F$$

$$LMTD = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{70,2 - 30,78}{\ln \left(\frac{70,2}{30,78} \right)}$$

$$LMTD = 4,81^\circ F$$

En esta zona del sistema de transferencia de calor aparece una cantidad adicional de calor a retirar, el cual corresponde al enfriamiento de 5,3 L de leche (volumen interno del sistema de enfriamiento, el cual es desplazado al introducir

el evaporador. Ver Figura 20). Una vez enfriada la leche contenida en el isotermo, se le adicionan los restantes 5,3 L para aforar los 40L comerciales.

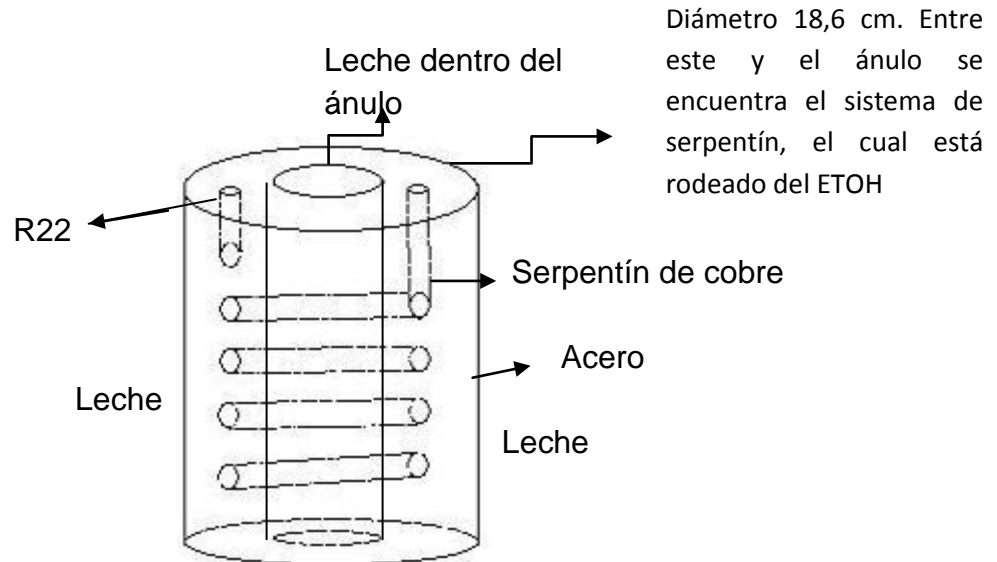


Figura 20. Representación ánulo, disposición serpentín en el evaporador.
Fuente: Autor

Este volumen es:

$$V \text{ ánulo} = \frac{\pi}{4} (D_1^2 - D_2^2) L$$

$$V \text{ ánulo} = \frac{\pi}{4} (18,6^2 - 14,2^2) \times 47 \text{ cm}$$

$$V \text{ ánulo} = 5.327, \text{ cm}^3$$

$$V \text{ ánulo} = 5,3 \text{ L}$$

El gas refrigerante R22 fluye a través de la tubería de cobre que actúa como serpentín enfriándolo en su recorrido; este (tubo de cobre) a su vez enfría al ETOH que al estar en contacto con las paredes de los tubos concéntricos (ánulo

y cubierta externa en acero inoxidable) enfría la leche en contacto con las mismas de 34,5°C hasta 3,3°C.

Ahora bien, el volumen de ETOH será menor que 5,3L porque hay que tener en cuenta el volumen del serpentín, sin embargo tomamos 5 L para hacer un cálculo conservador. Al tener el volumen del serpentín se puede hacer un recálculo, sin embargo esto se considera innecesario dado que el calor involucrado con el ETOH desplazado por el serpentín es muy pequeño comparado con los 5.215 BTU que debe absorber.

$$Q_{ETOH} = m_{ETOH} C_p ETOH \Delta t_{ETOH}$$

$$\rho = m/v \quad \rho v = m$$

$$\rho_{ETOH} = 50,6 \text{ lbm}/\text{pie}^3$$

$$V_{ETOH} = 5L = 0,177 \text{ pie}^3$$

$$C_p ETOH = 0,55 \text{ BTU}/\text{lbm}^\circ\text{F}$$

$$Q_{ETOH} = (\rho V) C_p \Delta t$$

$$Q_{ETOH} = 50,6 \frac{\text{lbm} \times 0,177 \text{ pie}^3}{\text{pie}^3} * \frac{0,55 \text{ BTU}}{\text{lbm}^\circ\text{F}} (31,82 - 72,24)^\circ\text{F}$$

$$Q_{ETOH} = -194,2 \text{ BTU} \quad (BC = 1h)$$



Calor que sale del sistema y que debe absorberlo el R22

$$Q_{TOTAL} = Q_{LECHE} + Q_{ETOH}$$

Q_{TOTAL} debe ser absorbido por el R22

$$Q_{TOTAL} = 5.215 \text{ BTU} + 194,2 \text{ BTU}$$

$$Q_{TOTAL} = 5.409,2 \text{ BTU}$$

$$Q_{TOTAL} = 5.410 \text{ BTU}$$

$$Q_{TOTAL} = 5.410 \text{ BTU/h (B.C. 1 hora)}$$

Ahora se calcula el serpentín necesario para transferir 5.410 BTU del ETOH al refrigerante R22.

$$Q_{TOTAL} = V_D A_s (LMTD) \text{ Donde } A_s = \text{área externa del serpentín}$$

$$\frac{Q_{TOTAL}}{V_D (LMTD)} = A_s$$

$$A_s = \frac{\frac{5.410 \text{ BTU}}{h}}{12,8 \frac{\text{BTU}}{\text{h pies}^2 \text{ } ^\circ\text{F}} * 47,81^\circ\text{F}}$$

$$A_s = 8,843 \text{ pies}^2$$

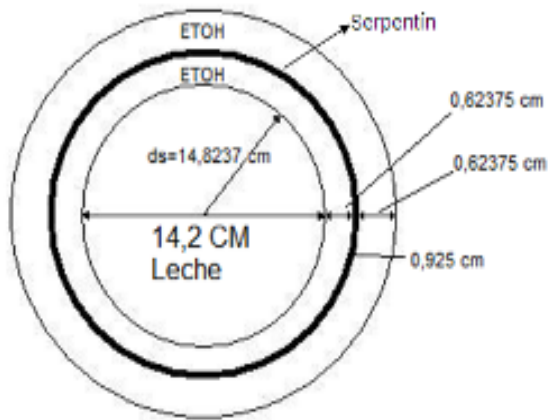
El serpentín debe ir dentro del ánulo:

$$\emptyset \text{ ánulo} = 18,6 \text{ cm} * \frac{1 \text{ pie}}{30,48 \text{ cm}} = 0,61 \text{ pies}$$

$$\emptyset \text{ ánulo} = 0,61 \text{ pies}$$

$$\emptyset \text{ tubo serpentín} = \frac{3}{8}''$$

Entonces el diámetro de la espira o vuelta del serpentín no debe ser mayor que 0,61 pies ni menor de 14,2cm = 0,466 pies, como se aprecia en la Figura 21.



$$18,6\text{cm} = 0,61\text{ pies}$$

Figura 21. Diámetros de paredes en el evaporador. Fuente: Autor

Por simetría se coloca el serpentín en el centro del anulo. Ver Figura 22.

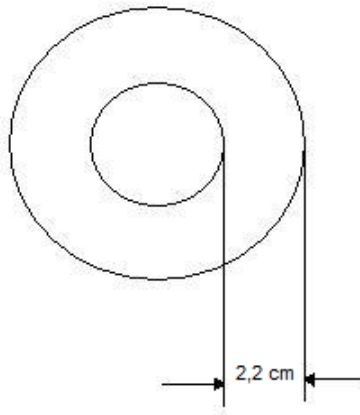


Figura 22. Espacio anular. Fuente: Autor

$$18,6 - 14,2 = 4,4\text{ cm}$$

$$4,4\text{cm} / 2 = \text{espacio anular} = 2,2\text{ cm}$$

$$\varnothing \text{ tubo} = 3/8'' = 0,9525\text{ cm}$$

$$2,2\text{ cm} - 0,9525 = 1,2475\text{ cm}$$

El serpentín debe ir a $1,2475/2 = 0,62375\text{ cm}$ de la pared del anulo para que quede en medio de él, según representación en Figura 23.

$$D_s = 1,2 + 0,62375 = 14,82375 \text{ cm}$$

Ahora se calcula el número de espiras (vueltas) que debe tener el serpentín para lograr el área de diseño,

$$A_s = 8,843 \text{ pies}^2$$

$$\text{Número de espiras} = \frac{A_s}{\text{área de una espira}}$$

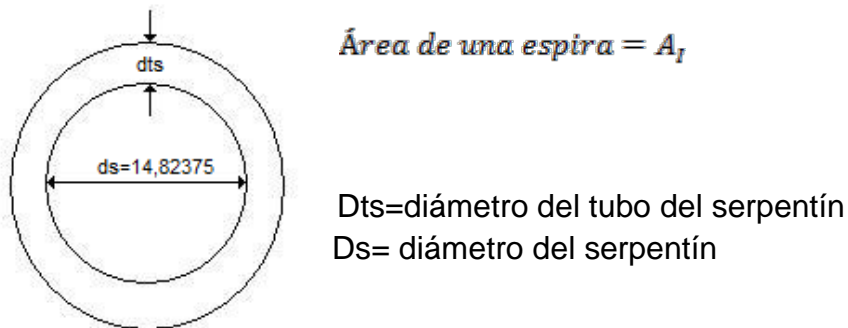
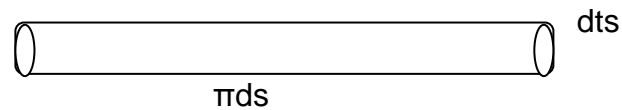


Figura 23. Espacio para acomodación del serpentín. Fuente: Autor

El área de una espira se determina según Figuras 24 y 25, así:



$$d_s = 14,82375 \text{ cm} = 0,4863 \text{ pies}$$

$$dt_s = 0,9525 \text{ cm} = \frac{3}{8} = 0,03125 \text{ pies}$$

Figura 24. Área del espiral (tubo de cobre sin seccionar). Fuente: Autor

Es como si el tubo de la espira se abriera



Figura 25. Área del espiral (desarrollo de tubería de cobre). Fuente: Autor

$L_i = \text{longitud de una espira}$

$A_i = \text{largo x ancho}$

$$A_i = (\pi ds)(\pi dts)$$

$$A_i = \pi * 0,4863 * \pi * 0,03125$$

$$A_i = 0,15 \text{ pies}^2$$

$$\text{Número espiras} = \frac{8,843 \text{ pies}^2}{0,15 \text{ pies}^2} = 59 \text{ vueltas}$$

$N_s = \text{Número espiras} = 59 \text{ vueltas}$

$\text{Altura del serpentín} = 59 \times 0,9525 \text{ cm serpentín}$

$\text{Altura del serpentín} = 56,2 \text{ cm}$ No cabe en el tanque que tiene 47cm de alto.

La solución está en armar un serpentín doble teniendo en cuenta que los serpentines deben tener un espacio entre espiral (vuelta) y espiral para maximizar la transferencia de calor, la acomodación se representa en las Figuras 26 y 27, en donde se esquematiza el espaciamiento entre estas.

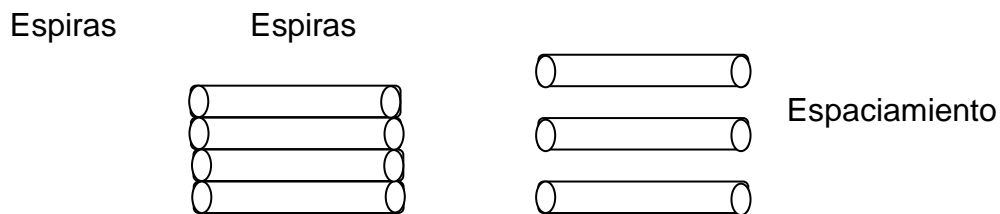


Figura 26. Acomodación espiral (serpentín). Fuente: Autor

Se arman dos serpentines de 30 espiras cada uno (las 59 espiras se redondean a 30 porque no tiene sentido media espiral)

$$Z_i = \text{altura de un serpentín} = 30 * 0,9525 = Z_i$$

$$Z_i = 28,6 \text{ cm}$$

$$\text{Altura del TK} = 47 \text{ cm}$$

$$47 - 28,6 = 18,4 \text{ cm}$$

Estos 18,4 cm se usan para calcular espacios entre las espiras.

Numero de espacios para 60 espiras= 59 espacios

Longitud disponible= 18,4 cm

$$\text{Espacios entre espiras} = \frac{18,4 \text{ cm}}{59} = ri = 0,31 \text{ cm}$$

$$ri = 0,31 \text{ cm}$$

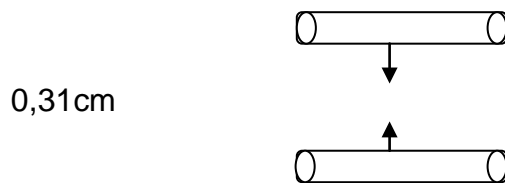


Figura 27. Espacio entre espiras. Fuente: Autor

Longitud de la tubería para armar 60 espiras LT.

LT = Longitud de tubería

$$LT = N_s L_i$$

$$LT = 60 \times 46,57 \text{ cm}$$

$$LT = 2.794,2 \text{ cm}$$

$$LT = 28 \text{ m} * 92 \text{ pies}$$

Obsérvese que lo importante es cumplir con el área $8,843 \text{ pies}^2$ (0.822 m^2), por lo tanto el segundo serpentín puede ser de diámetro mayor o menor que $d_s = 14,82375 \text{ cm}$, lo importante es que se puedan acomodar los 28 m de tubería de

0,9525 cm (3/8") de diámetro puesto que esto hace parte de la ingeniería de construcción del sistema de transferencia de calor y no de su teoría.

Finalmente el sistema queda:

$$Q = 5.410 \frac{\text{BTU}}{\text{h}}$$

$$U_D = 12,8 \left(\frac{\text{BTU}}{\text{h} * \text{pie}^2 * \text{°F}} \right)$$

$$\text{LMTD} = 47,81 \text{°F}$$

$$D_s = 14,82375 \text{ cm} = 0,486 \text{ pies}$$

$$A_s = 8,43 \text{ pie}^2$$

$$N_s = 60 \text{ espiras (vueltas)}$$

$$LT = 92 \text{ pies (28m)}$$

$$dts = \frac{3}{8} \text{ pies} = 0,03125 \text{ pies} = 0,9525 \text{ cm}$$

$$\text{Espaciamiento entre las espiras} = R_i = 0,31 \text{ cm}$$

Dos serpentines con una altura de 28,6 cm (0,94 Pies) en doble hélice, por ejemplo:

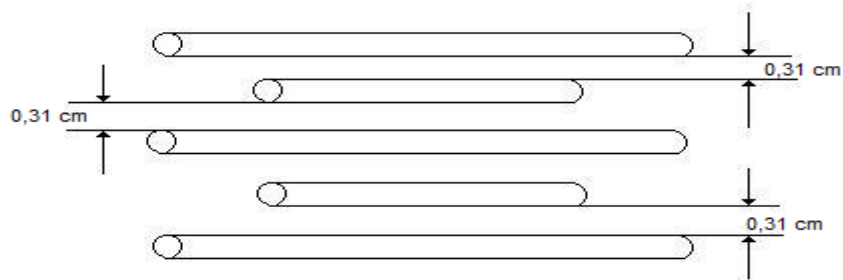


Figura 28. Acomodación espiral en doble hélice. Fuente: Autor

Esto ya es la Ingeniería del serpentín, por tanto la altura del serpentín doble es 47 cm (1,54 Pies) incluyendo los espaciamentos.

Variables de diseño de la unidad evaporadora (difusor):

- El sistema debe caber dentro de una cantina comercial donde se almacena y transporta la leche cruda
- El sistema debe entrar y salir por la boca del TK (para hacer aseo y desinfección, amén del aporte de frío)

Este serpentín se enchaqueta en el sistema anular diseñado anteriormente, dada la facilidad que ofrece el mismo, como se evidencia en la Figura 29.

$$B * C = 1h$$

$$Q_{Leche} = \frac{5.215 \text{ BTU}}{h}$$

$$UD = \frac{42 \text{ BTU}}{h * \text{pie}^2 \text{ } ^\circ\text{F}}$$

$$Rd = 0,005 \frac{h * \text{pie}^2 \text{ } ^\circ\text{F}}{\text{BTU}}$$

$$\text{LMTD} = 24,1^\circ\text{F}$$

$$A = 5,2 \text{ pies}^2$$

Sistema anular:

$$D_1 = 0,61 \text{ Pies} = 18,6 \text{ cm}$$

$$D_1 = 0,466 \text{ Pies} = 14,2 \text{ cm}$$

$$Z = 47 \text{ cm} = 1,54 \text{ pies}$$

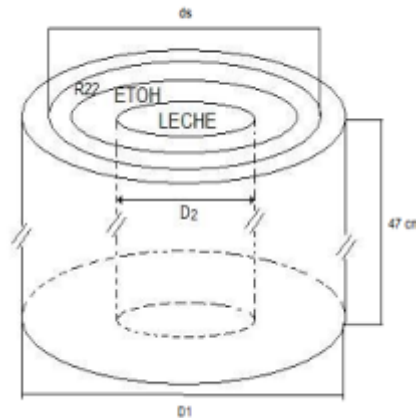


Figura 29. Encaquetado del serpentín en el sistema anular del evaporador.
Fuente: Autor

Calculo radio del aislante, poliuretano: En la Figura 30 se representa la acomodación del poliuretano inyectado en el encaquetado del TK isoterma.

r_a = Radio del aislante para minimizar la entrada de calor debido a $h_{\text{radiación}}$ y $h_{\text{convección}}$

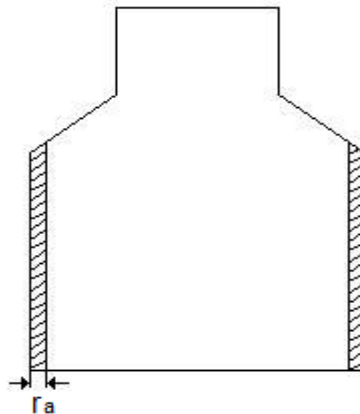


Figura 30. Radio de aislante térmico. Fuente: Autor

R_c = Radio por debajo del cual aumenta la transferencia de calor

$$R_c = \frac{K_{\text{poliuretano}}}{h_{\text{aire}} | T_{\infty} \text{ (h evaluando a } T_{\infty})}$$

$$K_{\text{poliuretano}} = 0,026 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}$$

T_{∞} = Temp. atmosférica Temp.Ambiental para Florencia se toma 30°C

$$T_{\infty} = 30^{\circ}\text{C}$$

$$h \left[T 30^{\circ}\text{C Florencia Caquetá} = \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}} \right]$$

$$R_c = \frac{K_{\text{poliuretano}}}{h \mid T_{\infty} = 30^{\circ}\text{C (Florencia)}}$$

$$R_c = 2,2 \times 10^{-3} \text{m}$$

$$R_c = 2,2 \text{ mm}$$

$$R_c = 0,085''$$

$$R_c = 7,2 \times 10^{-3} \text{pies}$$

Cálculo del coeficiente de operación, COP: (Esquemático en Figura 31)

$$COP = \beta$$

$$Q_L = Q_{\text{Lschs}} + Q_{\text{ETOH}}$$

$$Q_L = 5.410 + \frac{\text{BTU}}{h}$$

$$\beta = \frac{\text{Energía solicitada}}{\text{Energía que cuesta (\$)}}$$

$$B = \frac{Q_L}{W_{\text{Compresor}}}$$

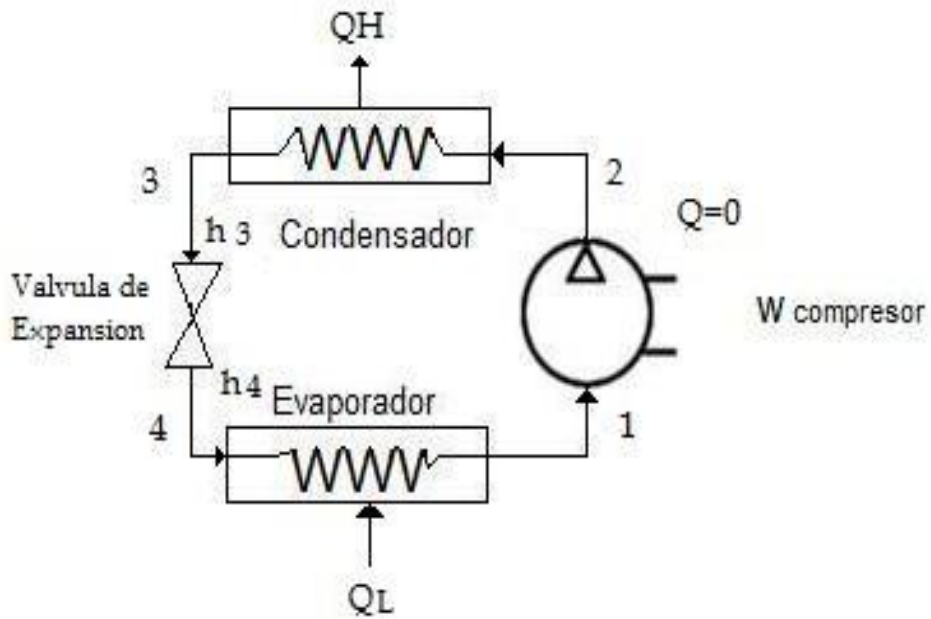


Figura 31. Sistema de refrigeración. Fuente: Autor

TL = Temperatura fría o baja (L = Low)

TH = Temperatura caliente o alta (H = Hot)

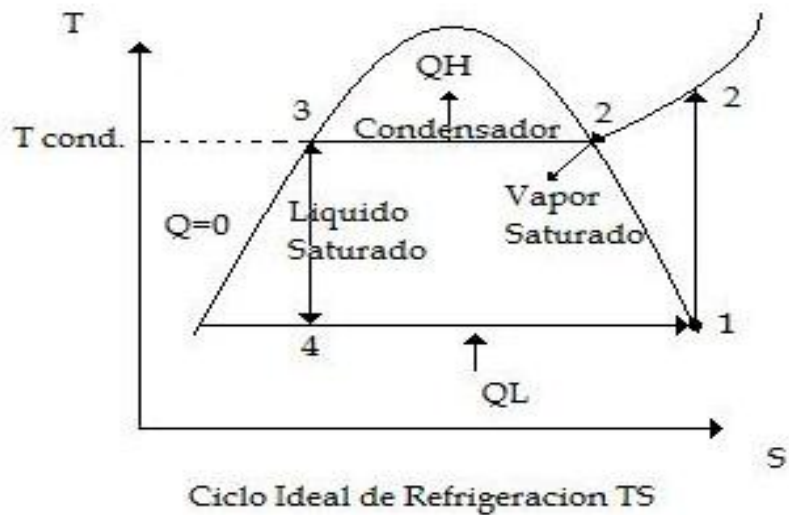


Figura 32. Ciclo Ideal de Refrigeración. Fuente: Kern, 1999

Ciclo de refrigeración: (Figura 32)

1-2 = Compresión adiabática $Q = 0$

2-3 = Cede calor a presión constante

3-4 = Estrangulamiento (disminución de presión) adiabático e isoentálpico.

$$ds = \frac{dQ}{T} \text{ (Segunda Ley de la Termodinámica)}$$

$$Tds = dQ$$

$$\int Tds = \int dQ$$

$$T\Delta S = 0$$

$$\Delta S = 0$$

$$T \neq 0$$

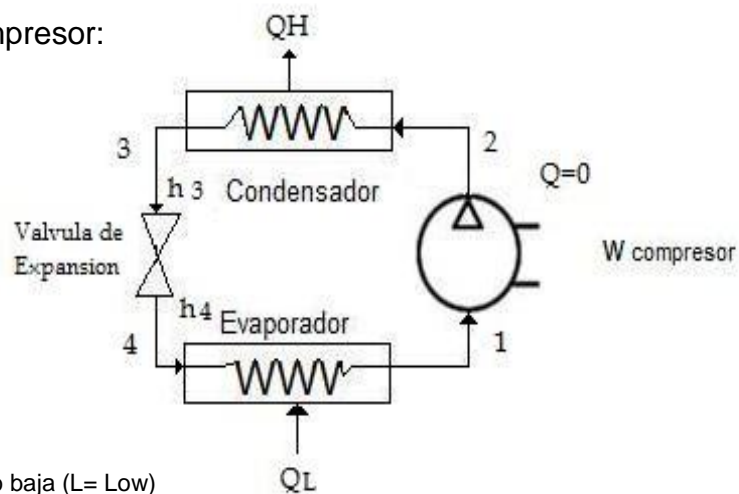
Isoentálpico $h =$ entalpia

$$h_{entra} = h_{sale} \quad h_3 = h_4$$

4 – 1 = Evaporación a Presión constante

$$h = h_{fg} = \text{cambio fase}$$

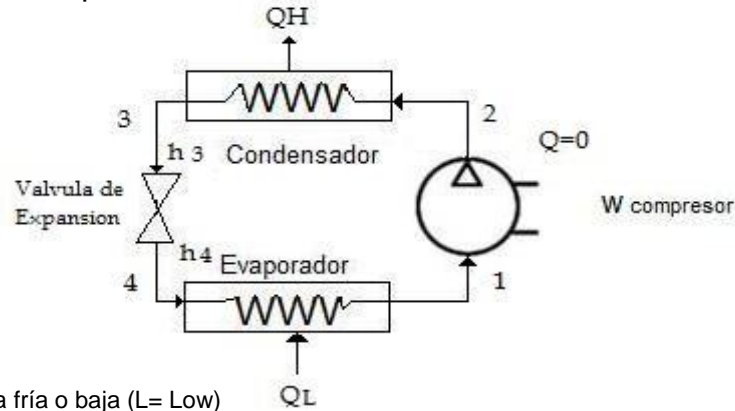
Calculo del W compresor (trabajo en el compresor según Figura 33): Balance de energía en el compresor:



TL = Temperatura fría o baja (L= Low)
 TH = Temperatura caliente o alta (H= Hot)
 T1 = -17,2°C

Figura 33. Sistema de refrigeración (balance de energía en el compuesto).
 Fuente: Autor

A continuación en la Figura 34 se muestra un esquema del refrigerador del sistema de transferencia de calor, se indica sobre el esquema su correspondiente equivalente.



TL = Temperatura fría o baja (L= Low)
 TH = Temperatura caliente o alta (H= Hot)
 QL = Corresponde el calor retirado por el R22

Figura 34. Sistema de refrigeración (equivalente). Fuente: Autor

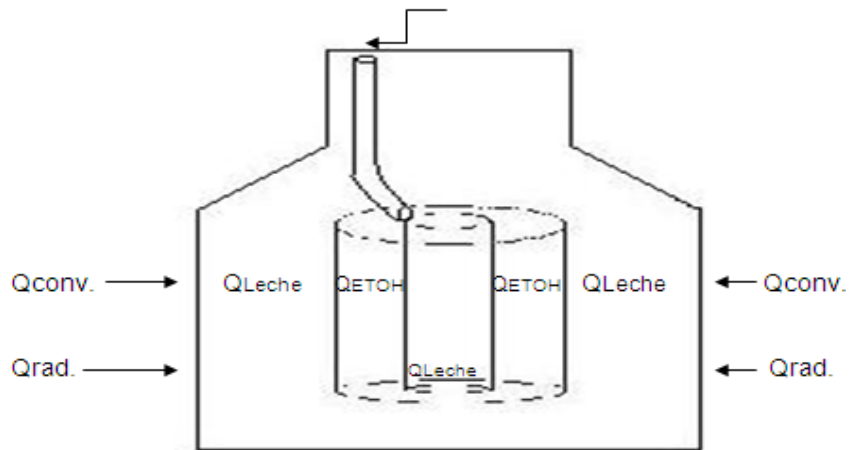


Figura 35. Coeficiente de transferencia de calor por convección y radiación. Fuente: Autor

$$Q_{Leche} = \text{Sensible} = mCp\Delta T$$

$$Q_{ETOH} = \text{Sensible} = mCp\Delta T$$

$$Q_{conv} = Q = \text{calor que entra el TK por convección}$$

$$Q_{rad} = Q = \text{calor que entra el TK por radiación}$$

Según el esquema del proceso anterior (Figura 32, ciclo de refrigeración):

Cálculo de h_4 , BCE (Figura 36): Energía en el evaporador por primera Ley de la Termodinámica:

$$q_L + \left(h_e + \frac{v_s^2}{2} + Z_s g \right) = \left(h_s + \frac{v_s^2}{2} + Z_s g \right) + W$$

$e = entrada$ $s = salida$

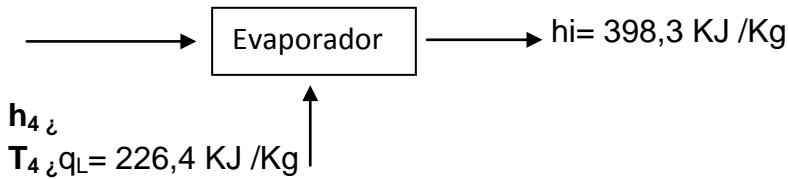


Figura 36. Cálculo de h_4 (evaporador). Fuente: Autor

$$q_L + h_4 = h_1 \quad h_4 = h_1 - q_L$$

$$h_4 = 398,3 - 226,4$$

$$h_4 = 171,9 \text{ KJ/Kg} \text{ (Con este valor se lee en tabla } = -24^\circ\text{C)}$$

$$T_4 = -24^\circ\text{C}$$

Calculo de h_3 BCE, en la Válvula de Expansión:

$$q = 0 \text{ (son adiabáticos)}$$

$$h_e = h_1 \text{ (son isoentálpicas)}$$

$$W = 0 \text{ porque } V = cte \quad W = \int p dv \text{ si } V = cte$$

$$\text{Entonces } dv = 0 \text{ y } \int p dv = 0 = W$$

$$T_3 = ?$$

$$h_3 = ?$$

$$0 + h_3 + \frac{v_3^2}{2} + Z_{3g} = h_4 + \frac{v_4^2}{2} + Z_{4g} + W$$

$$h_3 = h_4$$

$$h_3 = 171,9 \text{ KJ/Kg}$$

Al evaporar entra liquido saturado que viene del condensador con $h_4 = 171,9$ KJ/Kg entramos tabla propiedades refrigerante R22 y se lee= $T_4 = -24^\circ\text{C}$ y sale vapor saturado a $T_1 = -17,1^\circ\text{C}$.

Estado termodinámico del refrigerante R22 a la entrada de la válvula de expansión (salida del condensador):

$T_3 = 50^\circ\text{C}$ (medida in situ) es una variable de proceso.

$$h_3 = 171,9 \text{ KJ/Kg}$$

En el diagrama Th representado en la Figura 37, podemos ubicar el estado termodinámico:

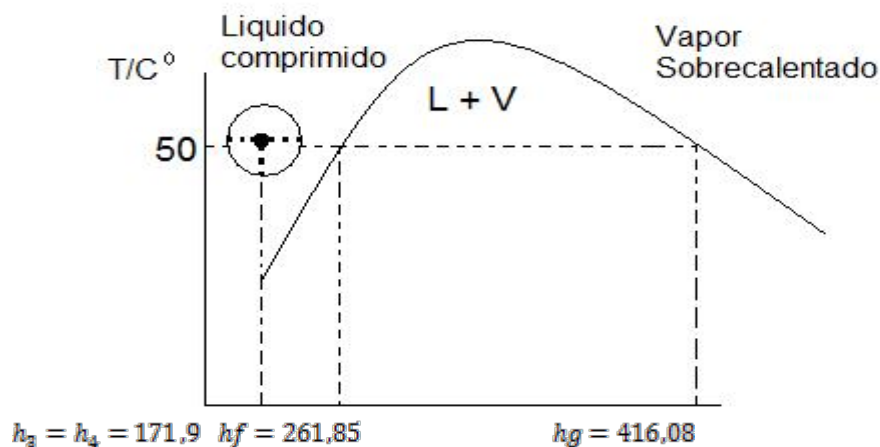
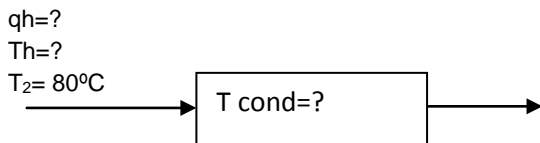


Figura 37. Diagrama Th. Fuente: Kern, 1999

El refrigerante R22 a 50°C y $h_4 = 171,9 \text{ KJ/Kg}$, se encuentra como Líquido Comprimido (ó Líquido Subenfriado), por lo que seguramente $h_4 > 171,9 \text{ KJ/Kg}$; el valor calculado suponiendo saturación. Como los líquidos se consideran incompresibles, es una buena aproximación suponer que los líquidos comprimidos ó subenfriados son casi similares a los líquidos saturados. El otro inconveniente es que hay pocos datos Termodinámicos para esta región, por Ej. El diagrama de Mollier no trae datos para la zona de líquidos subenfriados.

Calculo de Q_h (Figura 38): Balance de Energía en el Condensador:



$$T_3 = 50^\circ\text{C}$$

$$h_3 = 171,9 \text{ KJ/Kg}$$

Figura 38. Balance de energía en el condensador. Fuente: Autor

Como se generan demasiadas incógnitas no se puede calcular Q_h ; se procede entonces con un balance por primera y segunda Ley de la Termodinámica en el compresor (Figura 39) para calcular h_2 y luego determinar q_h y T en el condensador:

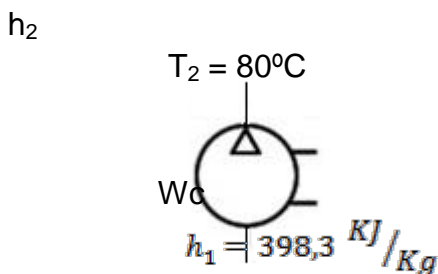


Figura 39. Balance de energía en el compresor. Fuente: Autor

Balance de Energía por 1ª Ley de la Termodinámica:

$$\overset{0}{q} + \overset{0}{h_1} + \overset{0}{\frac{\phi_1^2}{2}} + \overset{0}{Z_{1g}} = \overset{0}{h_2} + \overset{0}{\frac{\phi_2^2}{2}} + \overset{0}{Z_{2g}} + Wc$$

$$q = 0 \text{ (adiabático)}$$

$$h_1 = h_2 + Wc$$

Balance de Energía por 2ª Ley de la Termodinámica:

$$d_s = \frac{dQ}{T} \quad Q = 0 \quad T \neq 0$$

$$d_s = 0 \quad \rightarrow \quad \Delta S = 0 \quad \rightarrow \quad S_2 = S_1$$

En la tabla de propiedades del refrigerante R22:

$$S_1, \text{ con } T^o = -17,2^oC, \text{ se lee } 1,7773 \frac{KJ}{Kg^oK}$$

$$S_2 = S_1 = -1,7773 \frac{KJ}{Kg^oK}$$

$$\text{Con } T_2 = 80^oC$$

$$T_1 = 1,7773 \frac{KJ}{Kg^oK}$$

Con estos dos grados de libertad se ubica el valor de Ph del refrigerante R22 y se lee:

$$h_2 = 450 \frac{KJ}{Kg}$$

Por tanto Wc:

$$h_1 = h_2 + Wc$$

$$Wc = h_1 - h_2$$

$$W_c = 398,3 - 450$$

$$W_c = -51,7 \frac{KJ}{Kg} \quad (-) \rightarrow \text{Trabajo de Compresión}$$

Ahora se calcula q_h :

$$q_h = h_3 - h_2 = 171,9 - 450 \frac{KJ}{Kg}$$

$$q_h = -278,1 \frac{KJ}{Kg} \quad (\text{Valor negativo porque el calor esta saliendo})$$

Como la presión es constante $q_h = \Delta h$

La temperatura se lee en la tabla para líquidos saturados ya que el condensador se emplea para obtener líquidos: **T_{cond} = 62°C**

Cálculo de la Eficiencia del refrigerador del sistema de transferencia de calor:

La eficiencia se llama coeficiente de operación (COP) y se denota por β y es la relación entre la cantidad de calor absorbido en el espacio refrigerado (evaporador) y el trabajo de compresión destruido:

$$\beta = \frac{|q_L|}{|W_c|} = \frac{226,4}{51,7}$$

$$\beta = 4,4 \quad (\text{adimensional})$$

Valor que está afín a los reportados en la bibliografía por las empresas de la industria de la refrigeración, sector que reporta 4,61 (WHIRPOOL / SAMSUNG)

Estos cálculos no tienen en cuenta la producción de entropía que es dominio de la Termodinámica de Procesos Irreversibles, más allá de los alcances de este trabajo de investigación.

Cálculo de otro parámetro muy importante llamado Capacidad:

$$\text{Capacidad} = \frac{\dot{m} \text{ Refrigerante } q_L}{(\text{Ton} * H_2O) \lambda H_2O}$$

Para el refrigerante R22

$$\begin{aligned} \text{Capacidad} &= \frac{\dot{m}_{R22} q_L}{12.000 \text{ BTU}} \\ (\text{Ton} * H_2O) \lambda H_2O &= \frac{\text{BTU refrigerante}}{h} \\ &= \frac{12.660 \text{ KJ}}{h} \\ &= \frac{1 \text{ Ton.refrigeración}}{12.000 \text{ BTU}} \\ &= \frac{1 \text{ Ton.refrigeración}}{\frac{12.600 \text{ KJ}}{h}} \\ \text{Capacidad} &= \frac{\left(\frac{25,21 \text{ Kg}}{h} R_{22} \right) * \frac{226,4}{\text{Kg}}}{12.660 \text{ KJ}} \\ & \quad h \end{aligned}$$

Capacidad = 0,451 Toneladas de Refrigeración / día

Es decir, este sistema de refrigeración técnicamente produciría 456 Kg de hielo en un día de operación.

$$\frac{3.000 \text{ frigorías}}{h} * 0,451 \text{ Ton de Refrigeración} \\ \text{1 Ton Refrigeración}$$

$$\text{Capacidad} = 1.352,5 \text{ frigorías/h}$$

Costo de Energía hora de operación, °C, masa de leche enfrizada:

$$W_{\text{comp}} = \frac{51,7 \text{ KJ}}{\text{Kg}} \text{ (Compresor } 1/2 \text{ " HP)}$$

$$\frac{51,7 \text{ KJ}}{\text{Kg}} * \frac{25,21 \text{ Kg}}{\text{h}} * \frac{1 \text{ h}}{3.600\text{s}}$$

$$\frac{0,4 \text{ KJ}}{\text{s}} * \frac{8 \text{ h operación}}{\text{h}} * \frac{3.600\text{s}}{1 \text{ h}}$$

$$W_c = 11.520 \text{ KJ} * \frac{1\text{KW} - \text{h}}{3,6 \times 10^6\text{J}}$$

$$W_c = 3,2 \text{ KW} - \text{h}$$

Si el KW-h vale \$350, entonces:

$$\frac{\$350}{W} * \frac{3,2 \text{ KW}}{\text{h}} * 1,66 \text{ h (tiempo de operación del equipo)} = \$1.120$$

El costo del proceso de enfriamiento de la leche cruda de 34,4 a 3,3°C en un tiempo de operación de 70 minutos (1,166 horas) es de \$ 1.120

$$m_{\text{leche}} = 36\text{L} * 1,032 \frac{\text{Kg}}{\text{L}}$$

$$m_{\text{leche}} = 37,15214 \text{ Kg}$$

Disminución de Temperatura de la Leche:

$$34,4 - 3,3 = 31,1^\circ\text{C}$$

$$\text{Costo} = \frac{\$ 1.120}{31,1 \text{ } ^\circ\text{C} * 37,152 \text{ Kg Leche} * 8}$$

$$\text{Costo} = \frac{\$ 0,12}{^\circ\text{C} * \text{Kg} * \text{h}}$$

Costo Energético:

$$3,46 \times 10^{-4} \frac{\text{KW} - \text{h}}{\text{Kg leche } ^\circ\text{C} * \text{h}}$$

4.2 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

Construcción del prototipo a escala real, con los elementos y materiales definitivos para una posible producción en serie.

Para llegar a la construcción del equipo de refrigeración de leche cruda a ser usado en el sitio de producción (Ver Anexos M,T,V,W,X) se partió de la base de las condiciones de producción lechera en el Departamento del Caquetá: Ganadería extensiva doble propósito (baja producción per cápita), temperaturas y humedades relativas altas, pésima infraestructura vial (lo que demora sustancialmente el arribo de la materia prima a los centros de transformación agroindustrial, especialmente para la elaboración de quesillo), bajo nivel tecnológico de producción (nula cadena de frío desde el momento del ordeño, el cual se realiza de forma manual y en deficientes condiciones higiénicas); sumatoria de factores que generan condiciones ideales para incidir en el detrimento de la calidad microbiológica de la materia prima láctea.

Con base en las necesidades anteriormente mencionadas, se realizaron los cálculos termodinámicos pertinentes para el diseño en AUTOCAD (Ver Anexos A-H), de un equipo funcional, de fácil operación, eficiente y ajustado a las condiciones de producción; fue así como el diseño apunto a crear una innovación tecnológica, especialmente en el sistema de evaporación (Ver Anexos I,L,N) el cual no es estáticamente rígido, por cuanto los ductos de conducción del gas refrigerante son de material sintético flexible, resistente a altas presiones y con sistema de grafado (Ver Anexo R) entre estos y la tubería de cobre, lo que asegura la hermeticidad de toda la línea de conducción del gas refrigerante, permitiendo que esta unidad sea fácilmente operada de manera manual por inmersión; innovación tecnológica igualmente aplicada al tanque isoterma (Ver Anexos J,N) que es el resultado de la adecuación de una cantina de aluminio tradicionalmente usada para el transporte de la leche, consistente en la adaptación de una doble pared en la parte externa, con inyección de poliuretano entre las mismas, el cual actúa como aislante térmico permitiendo que la carga frigorífica que recibe la leche por contacto directo del evaporador, se conserve más allá de las ocho horas después del ordeño, asegurando que la cadena de frío sea efectiva hasta el inicio de la transformación agroindustrial una vez en planta de procesos de manufactura alimentaria. Esta adaptación no riñe con la forma tradicionalmente usada de contener la leche para su transporte, con la diferencia que se hace de manera segura con el método de conservación por refrigeración. Cabe anotar que en la parte superior del evaporador, se instaló un motoreductor con eje y aspa que pasa por el espacio vacío del mismo para la

agitación constante de la leche, durante los setenta minutos que emplea el equipo para la refrigeración del producto lácteo (Ver Anexo Y).

En la construcción de la estructura y el evaporador se empleo tubería de acero inoxidable de 2" de Ø y lámina calibre 20 (0,95 mm) lo que brinda resistencia y durabilidad, en el uso y mantenimiento (lavado y desinfección).

4.3 DETERMINACIÓN DE LA OPERABILIDAD Y CUANTIFICACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL EQUIPO DE REFRIGERACIÓN

La validación de desempeño del equipo de refrigeración se llevo a cabo en condiciones reales en el hato lechero del Centro de Investigaciones Amazónicas Macagual, distante 20 Km de la ciudad de Florencia-Caquetá (Colombia) a 1°37'N y 75°36'W, altura de 300 msnm; con producción promedio de 65L de leche/día. La región se clasifica según Holdridgs (1978) como bosque húmedo tropical, presenta precipitación pluvial media anual de 3.835 mm, promedio de humedad relativa entre 79,5% y 88.6% y temperatura del aire media anual de 26°C (CORPOICA 2005).

El equipo se instaló momentos previos al ordeño manual, siguiendo el protocolo de limpieza y desinfección para maquinaria, equipos y utensilios a entrar en contacto con una materia prima alimentaria (únicamente relacionados con el tratamiento térmico generado por el equipo de refrigeración), sin intervenir las

condiciones higiénicas de producción (piso del establo, ubres, baldes, manos del ordeñador), toda vez que se buscaba la mayor objetividad posible en la obtención de resultados generados por procesos llevados a cabo de forma real y sin intervenir en los mismos.

Una vez se obtenía la leche, esta se depositaba en el tanque isoterma hasta lograr un volumen de 35 L, para luego a través de inmersión colocar el evaporador (construido en acero inoxidable) dentro del tanque, momento en el cual se contabilizaba tiempo cero con un cronómetro digital, tomando el registro del mismo y de las temperaturas del interior del evaporador como de la leche contenida, con termómetros electrónicos, tal como lo muestra la tabla 3.

Tabla 3. Cuantificación del desempeño del prototipo.

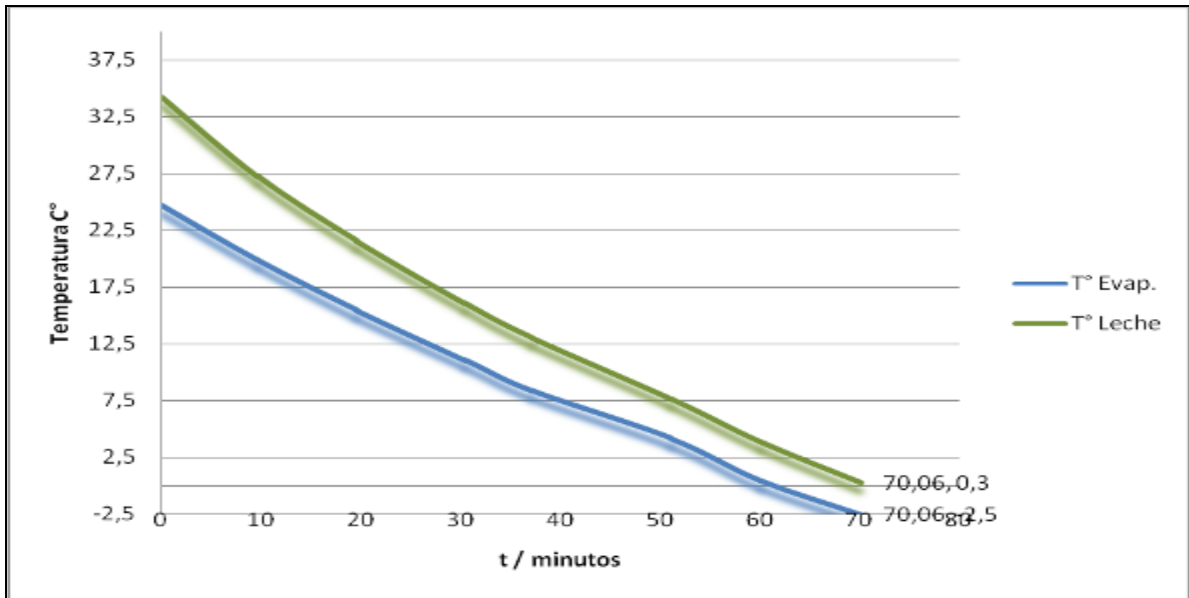
TIEMPO DE OPERACIÓN DEL PROTOTIPO	TEMPERATURA AL INTERIOR DEL EVAPORADOR (°C)	TEMPERATURA DE LA LECHE CONTENIDA EN EL TK ISOTERMO (°C)
00.00'.00''	24.7	34.3
00.03'.43''		31.6
00.03'.55''		31.2
00.05'.03''	21.8	
00.05'.11''	21.8	30.9
00.05'.50''	21.4	30.0
00.07'.17''	20.9	29.2
00.09'.02''	20.2	28.5
00.09'.40''	20.1	27.8
00.09'.58''	19.9	27.3
00.10'.46''	19.3	27.2
00.11'.30''	19.0	27.0
00.11'.36''	19.0	26.2
00.18'.19''	16.2	22.6
00.18'.48''	16.0	22.1
00.19'.23''	15.7	22.1
00.19'.53''	15.5	21.6
00.20'.38''	15.3	21.5

Tabla 3. (Continuación)

TIEMPO DE OPERACIÓN DEL PROTOTIPO	TEMPERATURA AL INTERIOR DEL EVAPORADOR (°C)	TEMPERATURA DE LA LECHE CONTENIDA EN EL TK ISOTERMO (°C)
00.24'.37"	13.6	19.4
00.24'.55"	13.4	18.5
00.28'.52"	12.1	17.2
00.29'.02"	12.1	16.4
00.29'.09"	12.1	17.1
00.30'.40"	11.1	16.1
00.34'.30"	9.5	14.3
00.35'.20"	9.2	14.1
00.37'.04"	8.4	13.1
00.46'.44"	4.7	8.9
00.47'.10"	4.6	8.5
00.47'.28"	4.6	8.4
00.48'.03"	4.2	7.7
00.51'.30"	3.1	6.7
00.51'.38"	3.0	6.2
00.52'.36"	2.7	5.1
00.55'.46"	1.7	4.9
00.55'.55"	1.7	4.4
00.56'.47"	1.4	4.3
00.57'.09"	1.3	4.0
00.58'.33"	0.9	3.8
00.59'.04"	0.7	3.6
00.59'.54"	0.6	3.7
01.00'.00"	0.5	3.9
01.00'.07"	0.5	3.4
01.01'.33"	- 0.1	3.3
01.02'.00"	- 0.2	2.5
01.03'.11"	- 0.6	2.8
01.04'.46"	- 1.0	2.1
01.05'.16"	- 1.1	2.0
01.06'.24"	- 1.4	1.9
01.06'.51"	- 1.6	1.6
01.07'.09"	- 1.7	0.8
01.09'.26"	- 2.2	0.8
01.09'.37"	- 2.3	0.6
01.09'.54"	- 2.4	0.5
01.10'.06"	- 2.5	0.3

Fuente: Autor

Gráfica 1. Cuantificación del desempeño del prototipo. Temperatura (c°) evaporador / leche vs tiempo



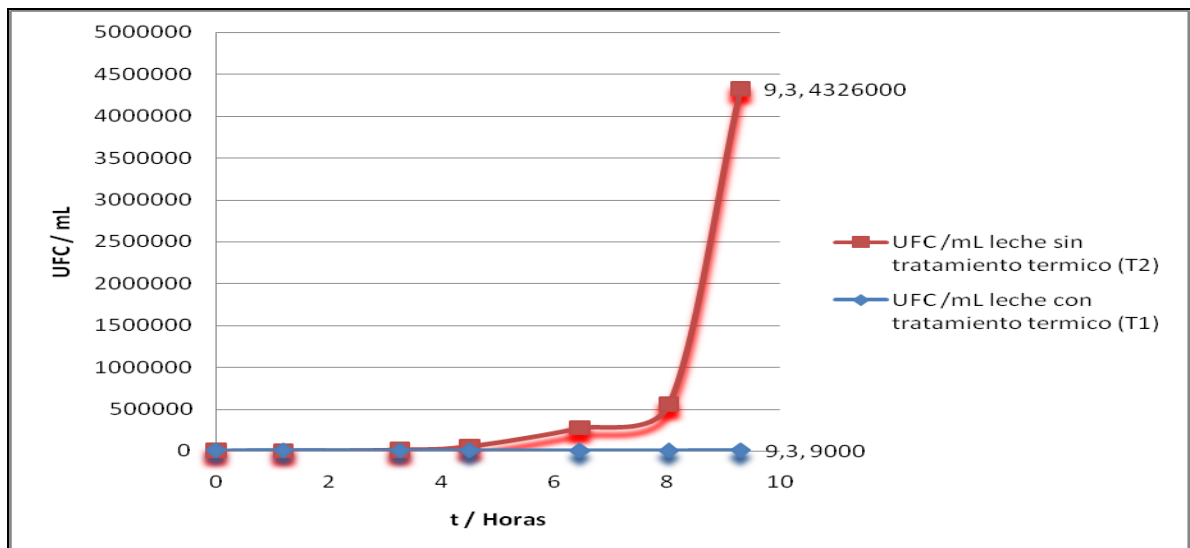
Fuente: Autor

Cuantificación mediante análisis de laboratorio del recuento de gérmenes totales. Efecto del prototipo sobre el desarrollo de la carga microbiana inicial, en lotes de leche con y sin utilización de éste.

Para la cuantificación del recuento de gérmenes totales, así como la determinación del efecto del prototipo sobre el desarrollo de la carga microbiana inicial, en lotes de leche con y sin utilización de éste, se tomaron muestras de leche antes del inicio del proceso de enfriamiento (en las leches sometidas a los dos tratamientos) y posterior a ello con intervalos de 1,0 a 1,5 horas, con el ánimo de cuantificar la efectividad no sólo del aporte frigorífico (aportado por el equipo mismo), sino de la conservación de este a través del tiempo (en el tanque isoterma); muestras que fueron analizadas en el laboratorio de calidad de la

planta de precondensación de la multinacional Nestlé con sede en la ciudad de Florencia-Caquetá, utilizando el método BACTO SCAN. Los resultados más que evidentes, muestran la efectividad de lo propuesto, representado en el recuento bacteriano en U.F.C. (Unidades Formadoras de Colonias) en la leche con tratamiento térmico de refrigeración, el cual esta significativamente por debajo del límite superior del rango de mayor exigencia de calidad microbiana, con resultados de 9.000 UFC/mL (según la Resolución 012 de 2007 de MINSALUD, leches con recuentos de hasta de 25.000 UFC/mL están ubicadas en el primer grado de calidad microbiológica), en contraposición con el recuento arrojado por las leches con tratamiento a temperatura ambiente, las cuales mostraron un significativo incremento de gérmenes, llegando a incrementos de hasta 4.263.000 UFC/mL en detrimento de su calidad (Gráfica 2).

Gráfica 2. Desarrollo microbiano (mesófilos totales) en leche con y sin tratamiento térmico de refrigeración.



Fuente: Autor

5. CONCLUSIONES

El objetivo principal propuesto fue logrado a través del abordaje técnico de los objetivos específicos, por cuanto se evidencia la evacuación del 100% de los mismos.

Se diseñó y construyó (con base en cálculos termodinámicos) un equipo de refrigeración de leche cruda para ser empleado en hatos de baja producción lechera, al cual le fueron realizadas las pruebas de funcionamiento (operabilidad) y puesta a punto, lográndose resultados satisfactorios en generación y conservación de frío.

Los beneficios de la utilización del equipo de refrigeración de leche cruda, radica en el inicio de la cadena de frío desde la misma producción láctea en las fincas ganaderas, evidenciándose recuentos de gérmenes totales de 9.000 UFC/mL, en leches con tratamiento térmico de refrigeración luego de transcurridas más de nueve horas del ordeño, en comparación de las 4.263.000 UFC/mL en leches del mismo lote, pero sin aporte de frío (manejo a temperatura ambiente).

La versatilidad del tanque isoterma utilizado en el proceso de enfriamiento de la materia láctea, hace que este se emplee como contenedor de la misma y pueda ser transportado en condiciones de cotidianidad, (medio terrestre ó fluvial a temperatura ambiente) hasta los centros de acopio y/o transformación agroindustrial, conservando su carga térmica de refrigeración, lo que inhibe el desarrollo microbiano de mesófilos totales.

El producto de este trabajo de grado se presenta a la comunidad en general, como un aporte a la búsqueda de soluciones a los bajos estándares de calidad láctea en el Departamento del Caquetá, sustentada ésta en el número de microorganismos presentes en las leches producidas; lo que directamente incide en la salud de los consumidores como efecto positivo social, amén de la utilidad económica del productor (bonificación al pago por bajo recuento microbiano y aporte de frío).

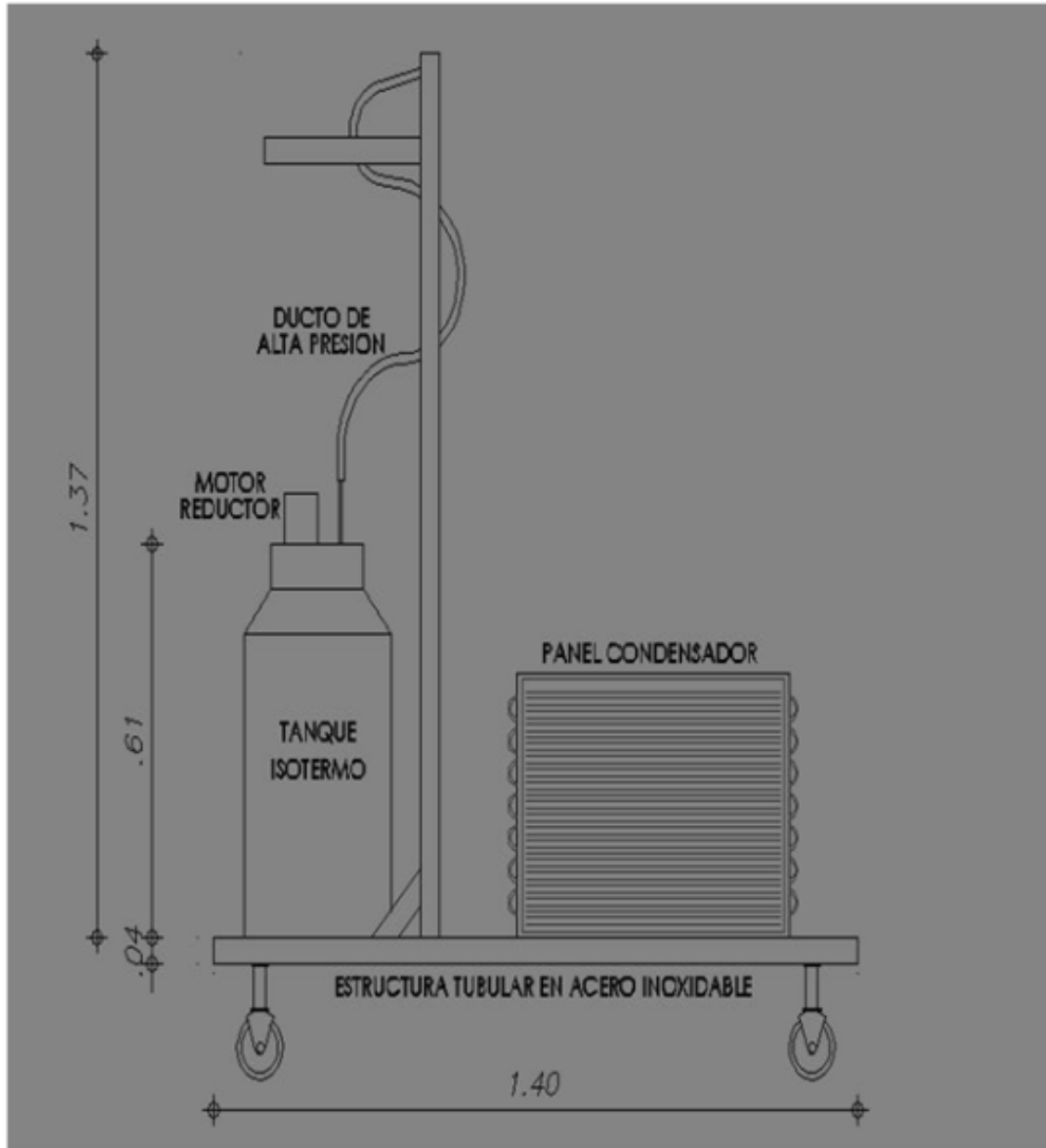
BIBLIOGRAFÍA

- AMIOT, Jean. 1991. *Ciencia y tecnología de la leche*. Zaragoza: Editorial Acribia.
- COUSIN, M.A. 1982. *Presence and activity of psychrotropic microorganisms in milk and dairy products: a review Journal of Food Protection*. Norway: Department of Food Science, Agricultural University of Norway.
- Decreto 616 de 2006. Ministerio de la Protección Social. Bogotá, Colombia, 28 de febrero de 2006.
- Decreto 2838 de 2006. Ministerio de la Protección Social. Bogotá, Colombia, 24 de agosto de 2006.
- FAO (eds) 1983. *Los sabores anormales en la leche fresca y reconstituida*. Roma: FAO.
- HAYES, P.R. 1993. *Microbiología e higiene de los alimentos*. Zaragoza: Editorial Acribia S.A.
- I.C.M.S.F. (International Commission on Microbiological Specifications for Foods) 2001. *Microorganismos de los alimentos. Ecología microbiana de los productos alimenticios*. Zaragoza: Editorial Acribia S.A.
- KERN, Donald Q. 1999. *Procesos de transferencia de calor*. 31 ed. México: Compañía Editorial Continental, S.A.
- LUENGAS, Gustavo. 1981. *Diseño de unidad refrigeradora para recolección y transporte de leche cruda*. Bogotá: UN Bogotá.

- MEERS, R.R., Baker, J., Bodyfelt, F.W. and Griffiths, M.W. 1991. *Psychrotrophic Bacillus spp in fluid milk products: a review. Journal of food protection.* Belthoven: National Institute of Public Health and Environmental Protection.
- MUIR, D.D. (1996 a). The shelf life of dairy products. *Factors influencing raw milk and fresh products.* Scotland: Journal of the society of dairy tecnology.
- MUIR, D.D. (1996 b). The shelf life of dairy products. *Raw milk and fresh products.* Scotland: Journal of the society of dairy tecnology.
- MUIR, D.D. (1996 c). The shelf life of dairy products. *factors influencing intermediate and long life dairy product.* Scotland: Journal of the society of dairy tecnology.
- Resolución 012 de 2007. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Bogotá Colombia, 12 de enero de 2007.
- SORHAUG, T. & Stepaniak, L. 1997. *Psychrotrophs and their enaymes in milk and dairy products: Quality aspects trenes in food sciencie and tecnology.* Norway: Department of Food Science, Agricultural University of Norway.
- SPEER, Edgar. 1991. Lactología industrial. Zaragoza: Editorial Acribia S.A.
- SUHREN, G. 1988. *Producer microorganisms.* in *Enzymes of Psychrotrophs in raw Food.* Elsevier Applied Science New York: editorial R.C. Mekeller,
- WALSTRA, Pieter. 2001. *Ciencia de la leche y tecnología de productos lácteos.* Zaragoza: Editorial Acribia.

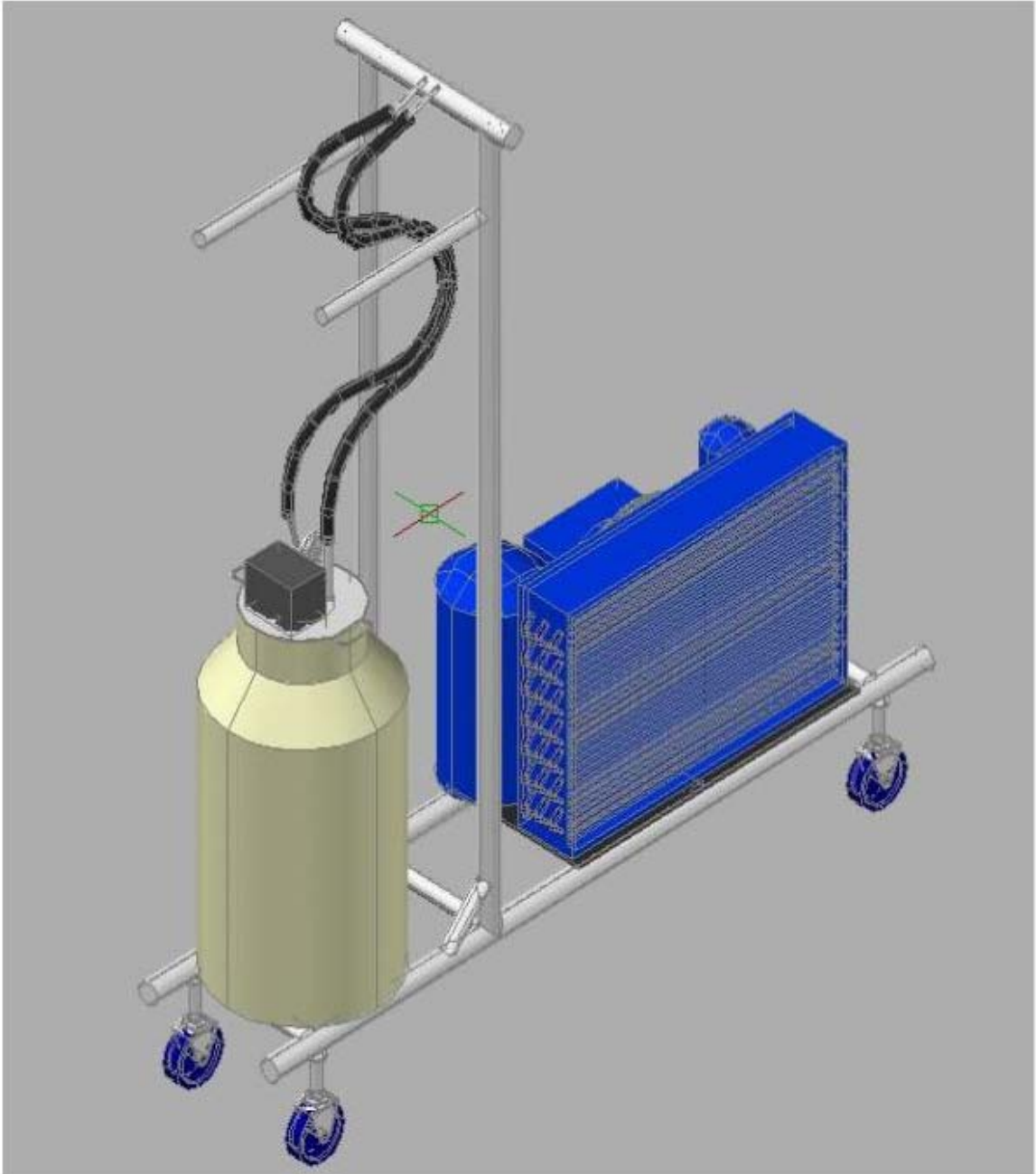
ANEXOS

Anexo A. Plano equipo de refrigeración



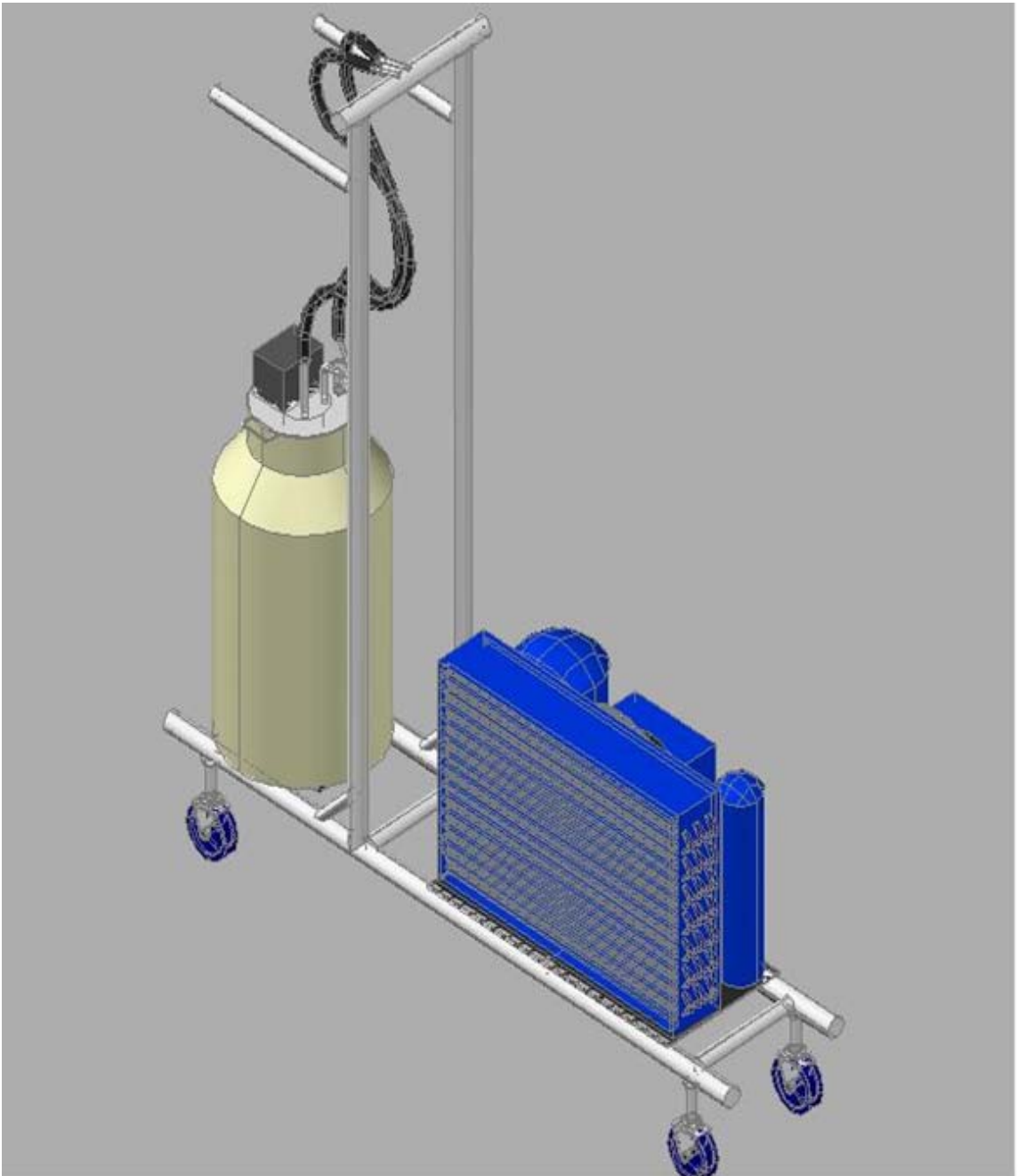
Fuente: Autor

Anexo B. Diseño de Autocad 3D. Vista lateral izquierda



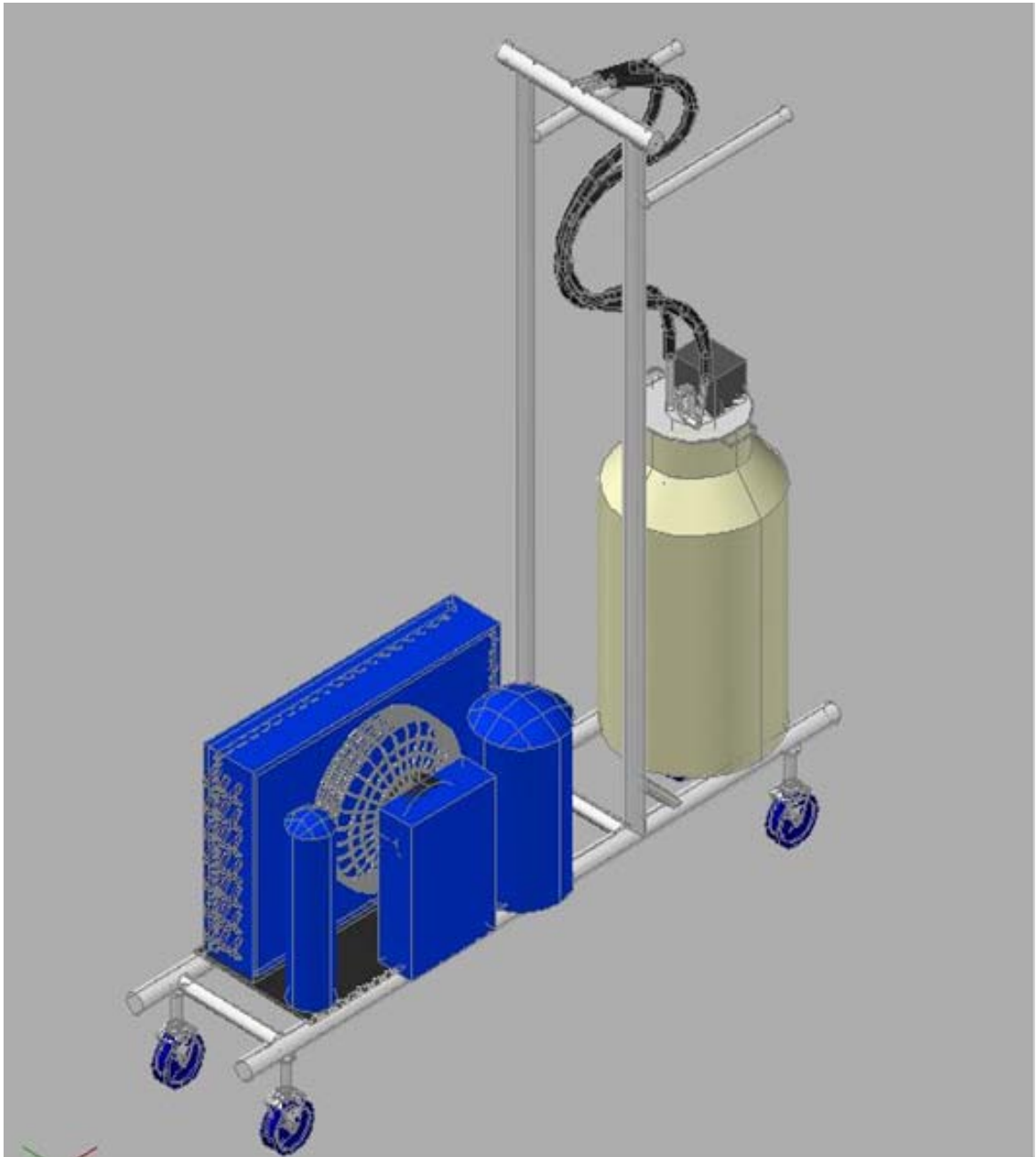
Fuente: Autor

Anexo C. Diseño de Autocad 3D. Vista lateral derecha



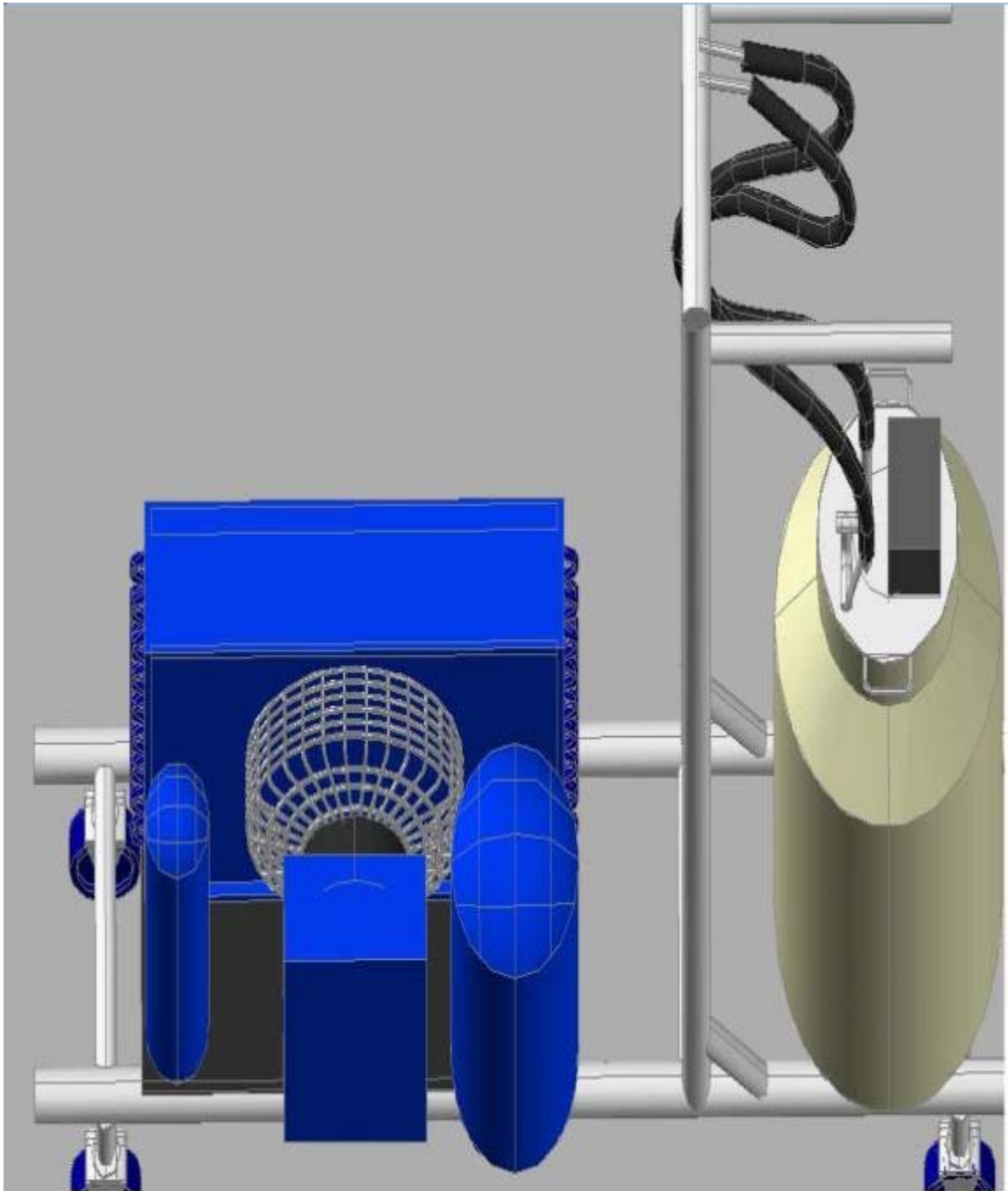
Fuente: Autor

Anexo D. Diseño de Autocad 3D. Vista posterior izquierda



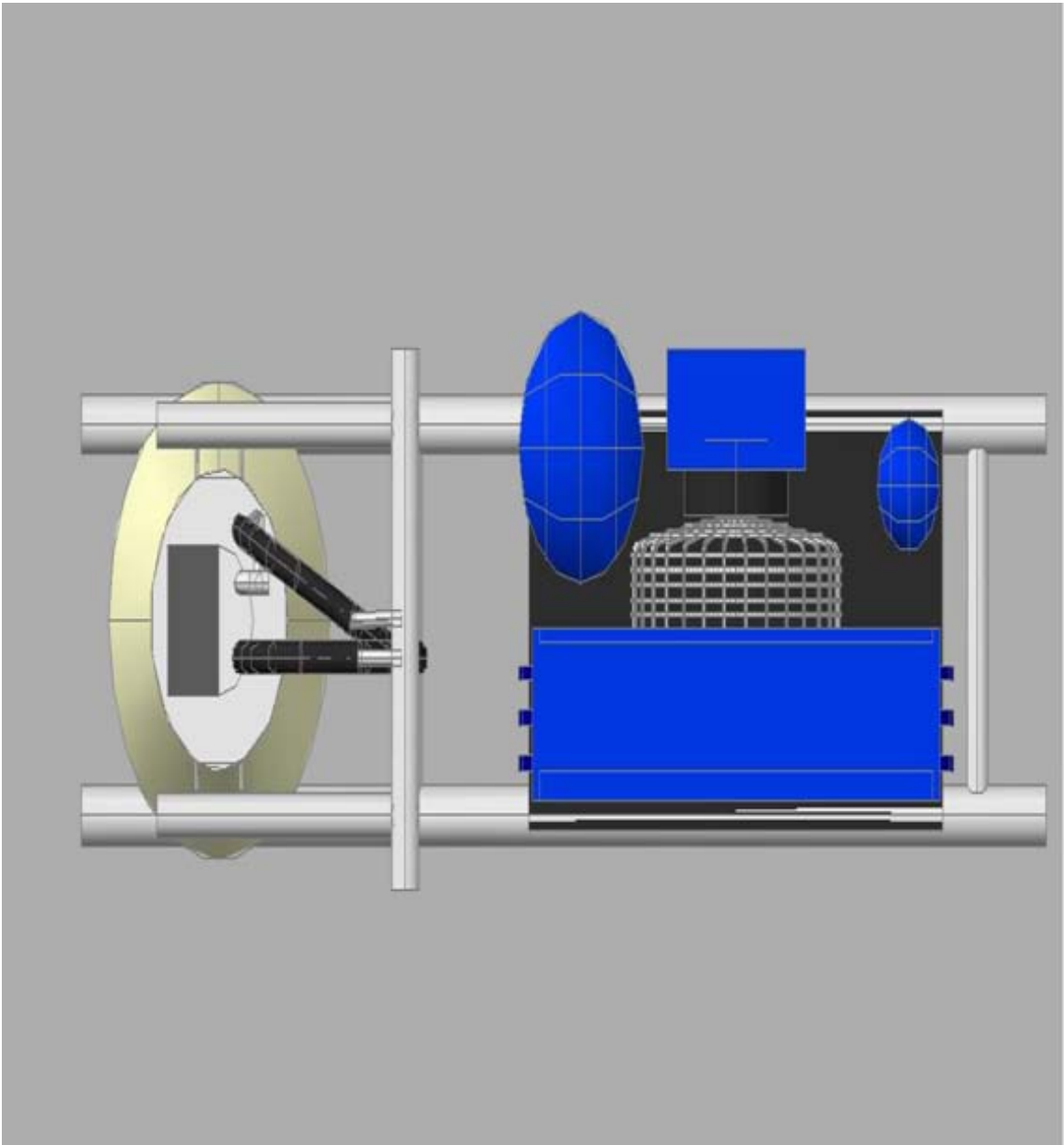
Fuente: Autor

Anexo E. Diseño de Autocad 3D. Vista lateral superior



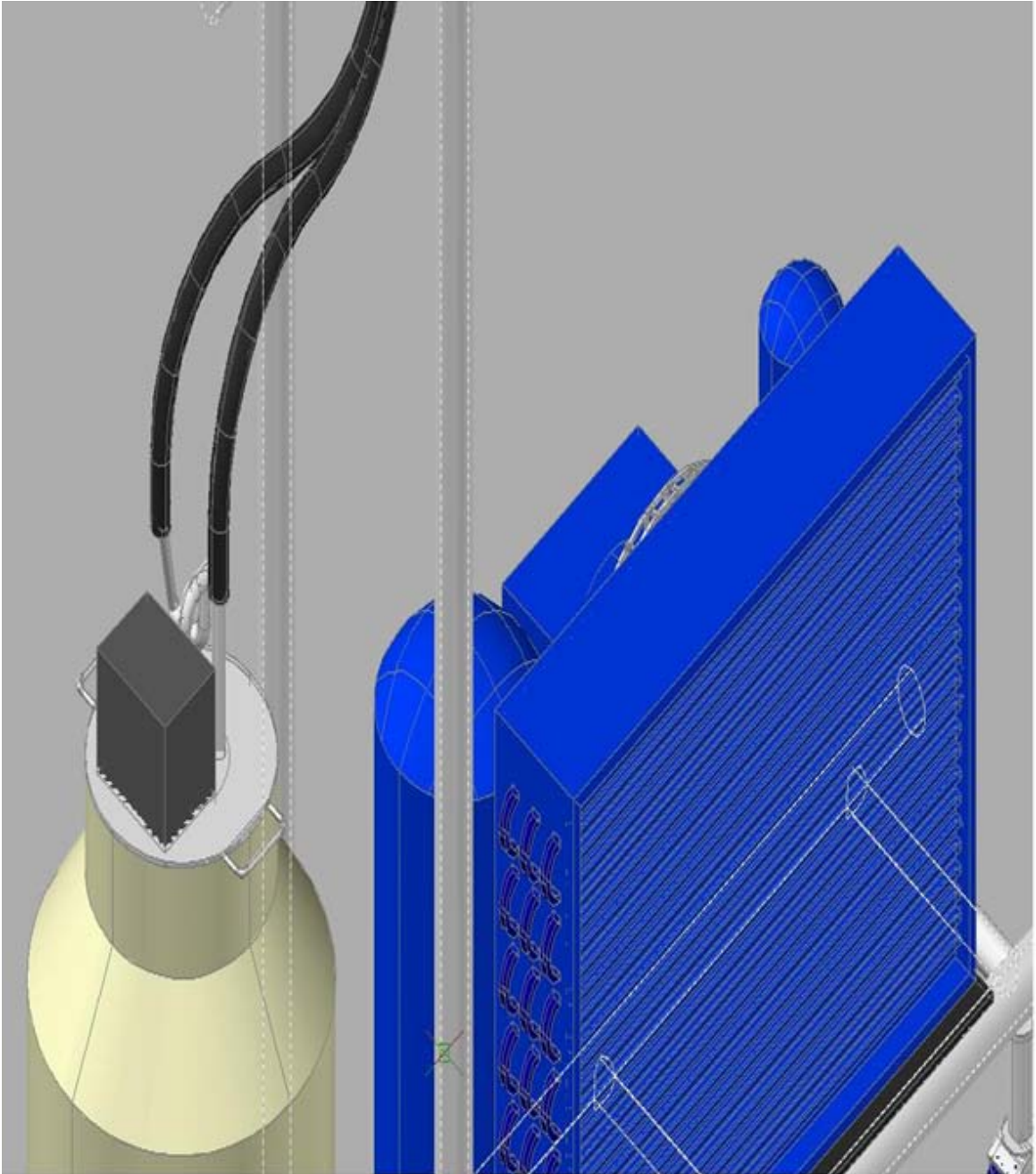
Fuente: Autor

Anexo F. Diseño de Autocad 3D. Vista superior



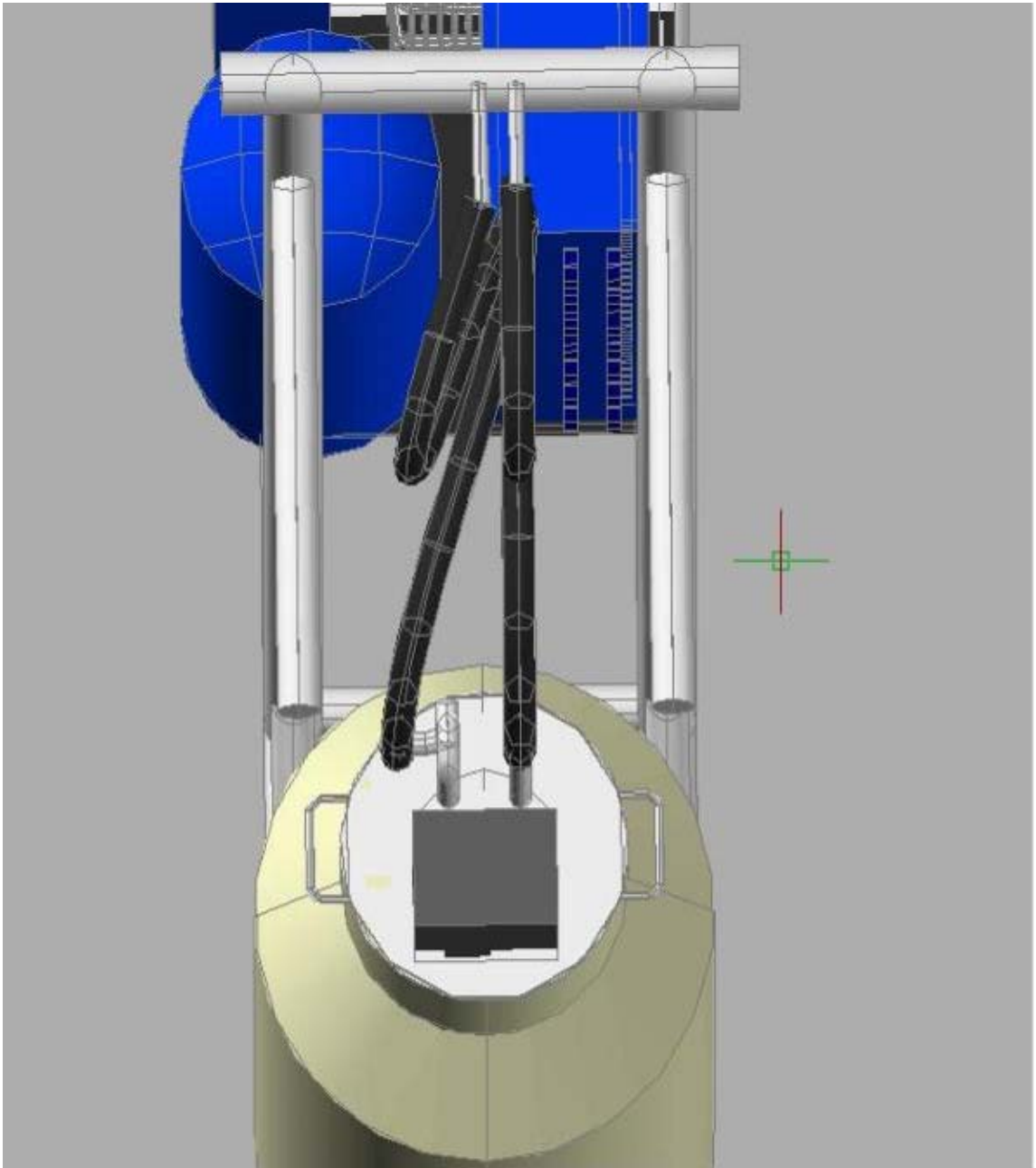
Fuente: Autor

Anexo G. Diseño de Autocad 3D. Vista frontal superior



Fuente: Autor

Anexo H. Diseño de Autocad 3D. Vista superior



Fuente: Autor

Anexo I. Construcción evaporador



Fuente: Autor

Anexo J. Construcción isoterma



Fuente: Autor

Anexo K. Válvula de expansión



Fuente: Autor

Anexo L. Vista superior construcción evaporador



Fuente: Autor

Anexo M. Vista frontal equipo de refrigeración



Fuente: Autor

Anexo N. Evaporador inmerso en TK isoterma



Fuente: Autor

Anexo O. Condensación en válvula de expansión y retorno



Fuente: Autor

Anexo P. Condensación en línea compresor - condensador



Fuente: Autor

Anexo Q. Condensación en válvula de expansión



Fuente: Autor

Anexo R. Sistema de grafado



Fuente: Autor

Anexo S. Funcionamiento (condensación) válvula de expansión



Fuente: Autor

Anexo T. Vista posterior equipo de refrigeración



Fuente: Autor

Anexo U. Vista lateral derecha Unidad compresora (en funcionamiento)



Fuente: Autor

Anexo V. Vista lateral derecha equipo de refrigeración



Fuente: Autor

Anexo W. Equipo de refrigeración en operación



Fuente: Autor

Anexo X. Equipo de refrigeración en operación



Fuente: Autor

Anexo Y. Temperaturas finales de operación, en unidad difusora y leche contenida en el tanque isoterma



Fuente: Autor