

DISEÑO DE UN SISTEMA DE EVAPORACIÓN DE REFRIGERANTE A
PRESIÓN Y TEMPERATURA CONTROLADA PARA LA ALIMENTACIÓN DE
TURBINAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA

MARÍA ALEJANDRA CASALLAS GONZÁLEZ
NÉSTOR FABIÁN CARDOZO CALDERÓN

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ D.C

2020

DISEÑO DE UN SISTEMA DE EVAPORACIÓN DE REFRIGERANTE A
PRESIÓN Y TEMPERATURA CONTROLADA PARA LA ALIMENTACIÓN DE
TURBINAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA

MARÍA ALEJANDRA CASALLAS GONZÁLEZ
NÉSTOR FABIÁN CARDOZO CALDERÓN

Proyecto integral de grado para optar por el título de
INGENIERO MECÁNICO

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ D.C

2020

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C, noviembre 2020

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. MARIO POSADA GARCÍA-PEÑA

Consejero Institucional

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectora Académica y de Investigación

Dra. MARÍA CLAUDIA APONTE GONZÁLEZ

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. RICARDO ALFONSO PEÑARANDA CASTRO

Secretaria General

Dra. ALEXANDRA MEJÍA GUZMÁN

Decano de la Facultad de Ingenierías

Ing. JULIO CÉSAR FUENTES ARISMENDI

Director del Departamento de Ingeniería Mecánica

Ing. CARLOS MAURICIO VELOZA VILLAMIL

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y los docentes no son responsables por las ideas y conceptos emitidos en el presente documento. Estos corresponden únicamente al autor.

Dedico este logro a Dios por bendecirme todos los días, por ser ese apoyo y fortaleza en los momentos de dificultad y debilidad, a mi familia por ser los principales promotores de mis sueños, por confiar y creer en mí, porque con su ejemplo, apoyo incondicional me impulsaron a luchar y alcanzar mis sueños; hoy veo que cumplo mi sueño, y se refleja en un peldaño más que avanzo en mi vida y que será la base en lo profesional y laboral. Finalmente agradecer a todas las personas que me han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que nos abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.

Néstor Fabián Cardozo Calderón

Dedico este logro a mi familia por su apoyo incondicional a lo largo de este proceso, por su amor, trabajo y sacrificio en estos años. Gracias por ser mi guía y darme las mejores bases y herramientas para construir mi camino.

María Alejandra Casallas González

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la Fundación Universidad de América por todos los conocimientos y experiencias enriquecedoras adquiridas durante el proceso de formación. También agradecer al comité de trabajo de grado y del departamento de ingeniería mecánica por su acompañamiento, asesoría y críticas constructivas que fueron de gran ayuda para el desarrollo del este proyecto.

Igualmente, agradecemos a todos los docentes que nos acompañaron en este proceso de formación y a todos aquellos que dispusieron de tu tiempo y conocimiento para la realización del mismo.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	21
1. SISTEMAS TERMODINÁMICOS QUE UTILIZAN FLUIDOS REFRIGERANTES	23
1.1 CICLOS DE POTENCIA DE VAPOR	23
1.1.1 Ciclo de Carnot.	23
1.1.2 Ciclo básico de Rankine.	24
1.2 UBICACIÓN DEL PROYECTO	25
1.3 SISTEMAS TERMODINÁMICOS	30
1.4 REFRIGERACIÓN	31
1.5 SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN	31
1.5.1 Sistemas de compresión de vapor.	31
1.5.2 Sistemas de absorción.	31
1.5.3 Sistemas de expansión de aire o gas.	32
1.5.4 Bombas de calor.	32
1.6 ELEMENTOS QUE COMPONEN UNA BOMBA DE CALOR	34
1.6.1 Compresor.	34
1.6.2 Condensador.	38
1.6.3 Dispositivo de expansión.	39
1.6.4 Evaporadores.	42
1.7 CLASIFICACIÓN DE LOS EVAPORADORES	42
1.7.1 Según el estado de refrigerante en su interior	42
1.7.2 Según su construcción	44
1.7.3 Enfriamiento de líquidos	46
1.8 REFRIGERANTE.	51
1.8.1 Propiedades.	52
1.8.2 Normativa.	53
1.8.3 Clasificación.	53
2. DISEÑO CONCEPTUAL Y MODO DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE EVAPORACIÓN DE REFRIGERANTE, EVALUANDO LAS ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN	60
2.1 DIAGRAMA DE PROCESO	60
2.2 PARÁMETROS BÁSICOS DE DISEÑO	61
2.3 DISEÑO CONCEPTUAL	62
2.4 ANÁLISIS Y MODO DE FUNCIONAMIENTO	64
2.4.1 Diseño preliminar	65
2.5 CONDICIONES DE DISEÑO	65
2.5.1 Cantidad de vapor producido	66

2.6	CAPACIDAD DE TRABAJO	66
2.6.1	Estructura	66
2.7	MÉTODO MATRIZ DE PRIORIZACIÓN	67
2.7.1	Matriz de priorización para la evaluación del mejor sistema de evaporación de refrigerante	68
2.7.2	Matriz de priorización para intercambiadores de calor	72
2.7.3	Matriz de priorización para método de calentamiento de agua	75
3.	DISEÑO DETALLADO DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA DE EVAPORACIÓN DE REFRIGERANTE SELECCIONADO	79
3.1	BALANCE TÉRMICO DE CICLO	79
3.2	DISEÑO DETALLADO DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN	84
3.2.1	Selección del evaporador	84
3.2.2	Selección del condensador.	85
3.2.3	Selección del compresor	91
3.2.4	Selección de la válvula de expansión	93
3.2.5	Selección de la tubería para el sistema de refrigeración	96
3.2.6	Selección del aislante para la tubería	97
3.3	DISEÑO DETALLADO DEL SISTEMA HIDRÁULICO	99
3.3.1	Selección del tanque de agua	100
3.3.2	Diseño y selección de la tubería	101
3.3.3	Selección de la bomba hidráulica	117
3.4	DISEÑO DETALLADO DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO DEL AGUA	121
3.4.1	Selección de la resistencia eléctrica	121
3.5	EFICIENCIA TOTAL EN EL SISTEMA	124
3.6	DISEÑO DETALLADO DEL SISTEMA DE CONTROL	127
3.6.1	Selección del PLC	128
3.6.2	Selección del sensor de temperatura	129
3.6.3	Selección del sensor de presión	130
4.	MANUALES	131
4.1	MANUAL DE INSTALACIÓN	131
4.2	MANUAL DE OPERACIÓN	136
4.3	MANUAL DE MANTENIMIENTO	138
4.3.1	Ficha técnica	138
4.3.2	Manual de mantenimiento	142
4.3.3	Tabla de fallas	148
5.	EVALUACIÓN FINANCIERA	149
5.1	COSTOS DEL SISTEMA	149
6.	EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL	151

7. CONCLUSIONES	156
8. RECOMENDACIONES	158
BIBLIOGRAFÍA	159
ANEXOS	163

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Tabla de clasificación de refrigerantes	54
Tabla 2. Refrigerantes CFC eliminados por la UTO	54
Tabla 3. HCFC "Hidroclorofluorocarburos"	55
Tabla 4. HFC "Hidrofluorocarburos"	55
Tabla 5. Mezclas de HFC "Hidrofluorocarburos"	56
Tabla 6. Mezclas alternativas de HCFC	57
Tabla 7. Matriz de priorización para la selección de sistema de evaporación de refrigerante	69
Tabla 8. Calificación de opciones por cada criterio	70
Tabla 9. Consolidado de calificación de opciones	71
Tabla 10. Calificación total por opción y criterio ponderado	71
Tabla 11. Matriz de priorización para la selección intercambiador de calor	73
Tabla 12. Calificación de opciones por cada criterio	74
Tabla 13. Consolidado de calificación de opciones	74
Tabla 14. Calificación total por opción y criterio ponderado	75
Tabla 15. Matriz de priorización para la selección del método de calentamiento de agua	76
Tabla 16. Calificación de opciones por cada criterio	77
Tabla 17. Consolidado de calificación por opciones y por criterio ponderado	77
Tabla 18. Calificación total por opción y criterio ponderado	77
Tabla 19. Componentes seleccionados para el diseño del sistema de evaporación.	78
Tabla 20. Datos de entrada	80
Tabla 21. Estado 3: "salida de la turbina"	81
Tabla 22. Estado 4: "salida del condensador"	82
Tabla 23. Estado 5: "salida de la válvula de expansión"	82
Tabla 24. Estado 1: "saluda del evaporador"	83
Tabla 25. Estado 2: "salida del compresor"	83
Tabla 26. Características generales del condensador tipo CRT	90
Tabla 27. Datos técnicos para la selección del compresor	93
Tabla 28. Especificaciones de la válvula de expansión termostática de tipo RJE	95
Tabla 29. Tubería de cobre tipo L	96
Tabla 30. Espesores mínimos de aislamiento (mm y pulg) de tuberías y accesorios que transportan fluidos fríos que discurren por el exterior de edificaciones	98
Tabla 31. Diseño y selección de la tubería	102
Tabla 32. Catálogo técnico EBARA.	120
Tabla 33. Modelos normalizados GCB-A, gama para agua. Temperatura máxima de trabajo: 150 °C	121
Tabla 34. Datos técnicos del PLC	129

Tabla 35. Datos técnicos del termostato	130
Tabla 36. Datos técnicos del presostato.	131
Tabla 37. Costos de fabricación de un ciclo orgánico Rankine	149
Tabla 38. Costos de fabricación de un ciclo Rankine	150
Tabla 39. Criterios de evaluación	151
Tabla 40. Valores resultantes para (I), método Conesa	152
Tabla 41. Matriz cualitativa, evaluación Conesa	154
Tabla 42. Matriz cuantitativa, evaluación Conesa	155

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Diagrama T-s para ciclo de vapor de Carnot	24
Figura 2. Diagrama de proceso y T-s de un ciclo Rankine	25
Figura 3. Zona de estudio departamento de Arauca	26
Figura 4. Esquema de funcionamiento de una bomba de calor	32
Figura 5. Esquema de bomba de calor agua-agua	33
Figura 6. Compresor rotativo	38
Figura 7. Válvula de expansión constante o automática	41
Figura 8. Evaporador inundado	43
Figura 9. Evaporadores semiinundados	44
Figura 10. Evaporador de tubos lisos	45
Figura 11. Evaporador de tubo con aletas	45
Figura 12. Evaporador de tubo descubierto	46
Figura 13. Evaporador tipo tanque	49
Figura 14. Evaporador tipo serpentín en casco	50
Figura 15. Evaporador tipo acorazado	51
Figura 16. Carta psicométrica	62
Figura 17. Datos técnicos del evaporador	85
Figura 18. Aislante para la tubería	97
Figura 19. Sistema hidráulico	100
Figura 20. Tanque de almacenamiento	118
Figura 21. Resistencias para inmersión, accesorios y calentadores de bidón	121
Figura 22. Simulación de programación del PLC	127
Figura 23. Diseño del tablero de control	128
Figura 24. Plano Sistema de evaporación de refrigerante	132
Figura 25. Manual de instalación	133
Figura 26. Descripción del procedimiento	136
Figura 27. Modo de operación	137
Figura 28. Ficha técnica	139

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Especificaciones de diseño	64
Cuadro 2. Guía para seleccionar condensadores	87
Cuadro 3. Manual de mantenimiento	143
Cuadro 3. (Continuación) Manual de mantenimiento.	144
Cuadro 3. (Continuación) Manual de mantenimiento.	146
Cuadro 3. (Continuación) Manual de mantenimiento.	147
Cuadro 4. Tabla de fallas	148

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Ecuación de calidad de la mezcla	82
Ecuación 2. Ecuación de calor en el evaporador	84
Ecuación 3. Ecuación de calor en el condensador.	85
Ecuación 4. Ecuación de Flujo másico del aire.	86
Ecuación 5. Ecuación del caudal del aire.	87
Ecuación 6. Ecuación de Calor total para seleccionar el condensador.	88
Ecuación 7. Ecuación de Trabajo del compresor.	91
Ecuación 8. Ecuación de Capacidad frigorífica de la válvula de expansión.	93
Ecuación 9. Flujo másico del agua.	102
Ecuación 10. Ecuación de Caudal del agua.	103
Ecuación 11. Ecuación del Diámetro interior de la tubería.	105
Ecuación 12. Ecuación del área de flujo.	105
Ecuación 13. Ecuación de velocidad del fluido.	106
Ecuación 14. Ecuación número de Reynolds sección A.	106
Ecuación 15. Factor de fricción sección A.	107
Ecuación 16. Ecuación de pérdidas de energía por fricción sección A.	108
Ecuación 17. Ecuación de pérdidas de energía por accesorios sección A.	109
Ecuación 18. Ecuación de pérdidas menores sección A.	109
Ecuación 19. Ecuación de pérdidas de energía por fricción sección B.	111
Ecuación 20. Ecuación de pérdidas de energía por accesorios sección B.	112
Ecuación 21. Ecuación de pérdidas menores sección B.	112
Ecuación 22. Ecuación de pérdidas de energía por fricción sección C.	114
Ecuación 23. Ecuación de pérdidas de energía por accesorios sección C.	115
Ecuación 24. Ecuación de pérdidas menores sección C.	116
Ecuación 25. Ecuación general de la energía.	118
Ecuación 26. Ecuación de la masa del agua.	122
Ecuación 27. Ecuación del Calor transferido por la resistencia eléctrica.	122
Ecuación 28. Ecuación del tiempo de calentamiento.	123
Ecuación 29. Ecuación de eficiencia térmica.	124
Ecuación 30. Ecuación del calor agregado al sistema.	125
Ecuación 31. Ecuación del calor liberado en el sistema.	125
Ecuación 32. Ecuación de calor para la turbina.	126

LISTA DE IMÁGENES

	pág.
Imagen 1. Compresor hermético	35
Imagen 2. Compresor semihermético	36
Imagen 3. Compresor abierto acoplado por correas	37
Imagen 4. Condensadores enfriados por aire	39
Imagen 5. Tubo capilar	40
Imagen 6. Válvula de expansión termostática	41
Imagen 7. Evaporador de doble tubo.	47
Imagen 8. Evaporador Baudelot	48
Imagen 9. Compresor semihermético	92
Imagen 10. Aislante térmico Armaflex XG Armacell	99
Imagen 11. Tanque cilíndrico	101
Imagen 12. PLC serie XC3 14E / 10S	128
Imagen 13. Termostato conexión a proceso 0 a +90 °C, 20A	129
Imagen 14. Interruptor de presión para controlar Compresores 115/230V 50/60Hz	130

LISTA DE DIAGRAMAS

	pág.
Diagrama 1. Diagrama de proceso	60
Diagrama 2. Diagrama de caja negra	63
Diagrama 3. Modo funcional del sistema de evaporación de refrigerante	65
Diagrama 4. Diagrama de flujo de energía	67
Diagrama 5. Evaporador, compresor, turbina, condensador, VE (Válvula de expansión)	80
Diagrama 6. Diagramas T-s y P-h.	81

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Cotización tubería de polipropileno para agua caliente	163
Anexo B. Cotización tubería de cobre 1 1/4"	165
Anexo C. Cotización codo cobre 90°.	166
Anexo D. Cotización codo de polipropileno 40mm – 1 1/4"	167
Anexo E. Cotización tanque de almacenamiento de 500 L.	168
Anexo F. Cotización aislante térmico para tubería de cobre.	169
Anexo G. Cotización válvula universal 1 1/4".	170
Anexo H. Cotización válvula de cheque 1 1/4".	171
Anexo I. Cotización intercambiador de calor de placas 62,3 Kw.	171
Anexo J. Cotización condensador.	173
Anexo K. Cotización electrobomba.	174
Anexo L. Cotización PLC.	175
Anexo M. Cotización termostato.	176
Anexo N. Cotización presostato.	177

GLOSARIO

FLUJO DE ENERGÍA: diagrama que permite catalogar los subsistemas que componen el sistema, en función de la transferencia de energía que se dará en el sistema una vez inicie su operación.

MATRIZ DE PRIORIZACIÓN: herramienta utilizada para la evaluación y selección de las diferentes opciones de diseño planteadas para el proyecto.

MÉTODO CONESA: sistema a partir del cual se evalúa el impacto ambiental que podría tener la implementación del sistema en un ambiente determinado.

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo principal diseñar un sistema de evaporación de refrigerante a presión y temperatura controlada para la alimentación de una turbina de generación eléctrica. Para ello, en primer lugar, se recopila información para caracterizar los sistemas de evaporación que utilizan fluidos refrigerantes; en segundo lugar, se indaga sobre los diferentes ciclos térmicos como, por ejemplo, el ciclo de Carnot, el ciclo de Rankine y el ciclo orgánico de Rankine, ciclos termodinámicos y sus diferentes componentes; en tercer lugar, se plantean diferentes parámetros de diseño para el correspondiente diseño conceptual y el modo de funcionamiento del sistema de evaporación de refrigerante que se encuentran en el mercado actualmente. Para esto último, se elabora un diseño conceptual que abarca todos los requerimientos para concretar el diseño del sistema. Cabe mencionar que dichos requerimientos cuentan con diferentes soluciones a partir de un diagrama de caja negra para determinar, de esa manera, su modo funcional y sus elementos clave para deducir el diagrama de flujo con el que se establecen los sistemas y subsistemas del proyecto.

En cuarto lugar, aplicando el método de priorización, se evalúan las diferentes alternativas esbozadas para el diseño, con el propósito de definir el diseño conceptual y el modo de funcionamiento del sistema, y así, poder proceder con el esquema detallado. En quinto lugar, después de precisar los elementos del sistema, se realizan los cálculos pertinentes, los cuales dan paso a la selección de componentes a partir de catálogos de diferentes proveedores de estos. En sexto lugar, una vez culminado el diseño detallado, se elaboran los correspondientes manuales de instalación, operación y mantenimiento en donde se especifica el paso a paso sugerido por los autores del presente documento para la correcta instalación y ensamble de cada uno de los componentes del sistema, el modo de operación que guía al usuario para su correcta manipulación y, por último, el manual de mantenimiento integrado por la ficha técnica del sistema, esto es, una tabla de inspecciones para cada uno de los subsistemas y una tabla de fallas.

En séptimo lugar, se culmina la fase de diseño elaborando un presupuesto total del sistema, considerando para ello los costos de materiales, elementos, instalación e ingeniería, analizando y comparando el costo total del proyecto con la implementación de un sistema de ciclo Rankine con los mismos parámetros de diseños ya definidos. Y, finalmente, en octavo lugar, teniendo en cuenta el método Conesa, se realiza una evaluación de impacto ambiental, con el fin de determinar el impacto que tendría la instalación del sistema en el medioambiente.

Palabras clave: sistemas de evaporación, refrigerante, ciclo orgánico de Rankine.

INTRODUCCIÓN

La producción de vapor de agua para aplicaciones industriales y semiindustriales se lleva a cabo para generar electricidad, empleando para ello un ciclo Rankine. Dicho ciclo funciona a temperaturas y presiones elevadas, lo que implica el uso de calderas alimentadas con combustibles fósiles. Como consecuencia de ello, se generan problemas de contaminación que se ven reflejados en alteraciones del efecto invernadero con emisiones de CO₂ y el incremento de la acidificación de las aguas en general. Por otra parte, aunque el combustible es producido en zonas petrolíferas, se cuenta con el proceso de refinación, con el transporte y de un sistema de almacenamiento y de control para combustible, haciendo de este un proceso para la obtención de vapor más costoso.

En relación con esto último, en el artículo 4 de la Resolución 6982, capítulo II, se determinó que “Toda fuente fija que utilice combustibles sólidos y/o crudos pesados, debe contar con equipos de control instalados y funcionando”¹. Por esto, de acuerdo con los problemas anteriormente planteados, se evidencia la necesidad de implementar una nueva forma de alimentar una turbina que produce la energía mecánica requerida por el generador de esta en la región de Arauca, para la extracción de petróleo en el campo petrolífero Caño Limón. En ese sentido, se propone, dentro de un plan de generación eléctrica ambientalmente sostenible, diseñar un sistema de evaporación de refrigerante en donde el uso de calderas sea sustituido por un sistema de evaporación. Asimismo, aprovechando las condiciones termodinámicas que ofrece el refrigerante, se espera que aumente su temperatura por medio de una transferencia de calor entre este y las aguas del Río Arauca a temperatura ambiente hasta ser evaporado y, posteriormente, ser dispuesto para una turbina diseñada para este tipo de refrigerantes.

Dicho lo anterior, el presente proyecto contempló como objetivo general diseñar un sistema de evaporación de refrigerante a una presión y temperatura controlada para la alimentación de una turbina de generación eléctrica. Para su oportuno cumplimiento, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar los sistemas termodinámicos que utilizan fluidos refrigerantes.
- Realizar el diseño conceptual y el modo de funcionamiento del sistema de evaporación de refrigerante, evaluando las alternativas de solución.
- Realizar el diseño detallado de los componentes del sistema de evaporación de refrigerante seleccionado.
- Elaborar los respectivos manuales de ensamble, operación y mantenimiento.
- Realizar un estudio financiero y de impacto ambiental del proyecto.

¹ COLOMBIA. SECRETARIO DISTRITAL DE AMBIENTE. Resolución Número 6982 de 2011. [Por la cual se dictan normas sobre prevención y control de la contaminación atmosférica por fuentes fijas y protección de la calidad del aire]. Bogotá, D.C., 2011, artículo 4.

Finalmente, el proyecto se enfocó en el diseño detallado del sistema de evaporación de refrigerante, dejando así el plano general del sistema, recomendaciones para su proceso de instalación y presupuesto total para dar paso al desarrollo, implementación y/o estudio de este.

1. SISTEMAS TERMODINÁMICOS QUE UTILIZAN FLUIDOS REFRIGERANTES

1.1 CICLOS DE POTENCIA DE VAPOR

Los ciclos de potencia de vapor son aquellos en los que el fluido de trabajo se evapora y condensa alternadamente. Asimismo, a través de estos se analiza la generación de potencia acoplada con un proceso de calentamiento llamada cogeneración². Por lo general, el fluido de trabajo durante el ciclo es agua, y cuando existen procesos de cogeneración en este tipo de ciclos, se obtiene energía térmica y energía eléctrica útil. Dentro de los ciclos de potencia de vapor se encuentra el ciclo de Carnot y el ciclo Rankine, los cuales se explican a continuación.

1.1.1 Ciclo de Carnot. “El ciclo de Carnot es el más eficiente de los ciclos que operan entre dos límites especificados de temperatura. Así, es natural considerar primero a este ciclo como un prospecto de ciclo ideal para las centrales eléctricas de vapor. Si fuera posible, se adoptaría como el ciclo ideal. Sin embargo, (...) este ciclo no es un modelo apropiado para los ciclos de potencia”³. Lo anterior, puesto que a este modelo se asocian varias situaciones imprácticas como, por ejemplo:

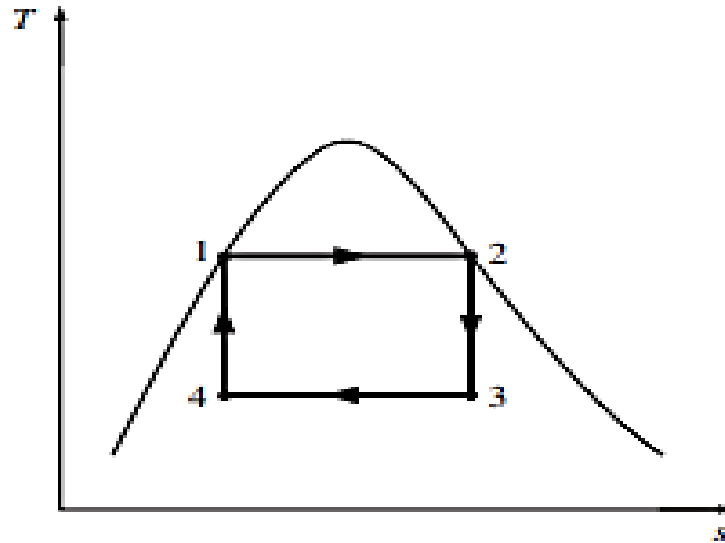
1. La transferencia isotérmica de calor hacia o desde un sistema de dos fases no es difícil de alcanzar en la práctica, porque una presión constante en el dispositivo fija automáticamente la temperatura en el valor de saturación. restringir los procesos de transferencia de calor a sistemas de dos fases limita severamente la temperatura máxima que puede utilizarse en el ciclo (tiene que permanecer debajo del valor del punto crítico, el cual es de 374 °C para el agua). Restringir la temperatura máxima en el ciclo limita también la eficiencia térmica. Cualquier intento por elevar la temperatura máxima en el ciclo implica la transferencia de calor hacia el fluido de trabajo en una sola fase, lo que no es fácil de realizar de modo isotérmico.
2. El proceso de expansión isentrópica (proceso 2-3) puede aproximarse bastante mediante una turbina bien diseñada. Sin embargo, la calidad del vapor disminuye durante este proceso, como se observa en el diagrama T-s de la imagen 1. Por lo tanto, la turbina tiene que manejar vapor con baja calidad, es decir, vapor con un alto contenido de humedad. El choque de gotas líquidas sobre los álabes de la turbina produce erosión y es una de las principales fuentes de desgaste. Así, el vapor con calidades menores a 90 por ciento no pue de ser tolerado en la operación de centra les eléctricas.
3. El proceso de compresión isentrópica (proceso 4-1) implica la compresión de una mezcla de líquido y vapor hasta un líquido saturado. Hay dos dificultades asociadas con este proceso: primero, no es fácil controlar el proceso de condensación de

² ÇENGEL, Yunus y BOLES, Michael. Termodinámica. Cuarta edición. México: Mc-Graw Hill, 2003.

³ Ibíd., p. 494.

manera tan precisa como para obtener finalmente la calidad deseada en el estado 4; y segundo, no es práctico diseñar un compresor que maneje dos fases.⁴

Figura 1. Diagrama T-s para ciclo de vapor de Carnot



Fuente: ÇENGEL, Yunus y BOLES, Michael. Termodinámica. Cuarta edición. México: Mc-Graw Hill, 2003

1.1.2 Ciclo básico de Rankine. Es posible eliminar muchos de los aspectos imprácticos asociados con el ciclo de Carnot si el vapor es sobrecalentado en la caldera y condensado por completo en el condensador, [como se muestra de manera esquemática en un diagrama T-s de la Figura 2]. Lo que resulta es el ciclo Rankine, el cual es el ciclo ideal para las centrales eléctricas de vapor. El ciclo Rankine ideal no incluye ninguna irreversibilidad interna y está compuesto de los siguientes cuatro procesos:

1-2 Compresión isentrópica en la bomba.

2-3 Adición de calor a presión constante en una caldera.

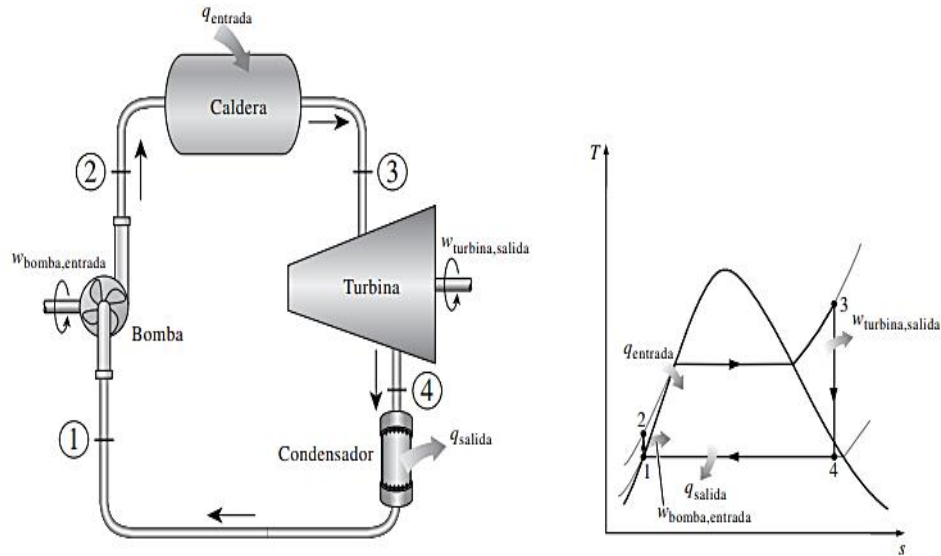
3-4 Expansión isentrópica en una turbina.

4-1 Rechazo de calor a presión constante en un condensador.⁵

⁴ Ibíd., p. 301.

⁵ Ibíd., p. 301.

Figura 2. Diagrama de proceso y T-s de un ciclo Rankine



Fuente: ÇENGEL, Yunus y BOLES, Michael. Termodinámica. Cuarta edición. México: Mc-Graw Hill, 2003

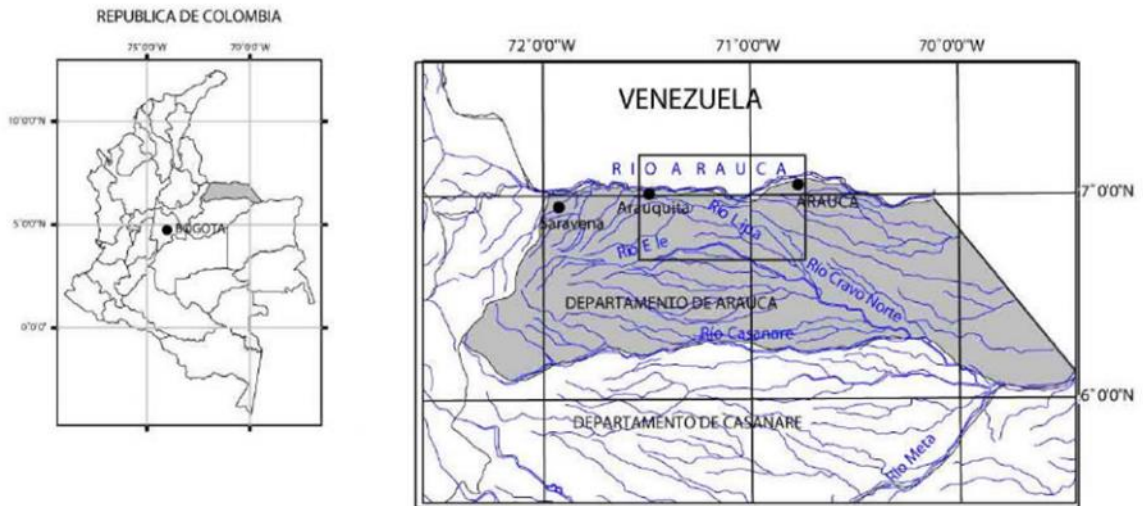
De esta forma, por medio de este ejercicio investigativo se pretendió implementar un ciclo orgánico de Rankine, sustituyendo la caldera por un evaporador. Este intercambiador de calor permite obtener vapor refrigerante a temperatura y presión controlada.

1.2 UBICACIÓN DEL PROYECTO

Para comprender los sistemas termodinámicos que utilizan fluidos refrigerantes es necesario caracterizar la refrigeración, los sistemas de refrigeración y evaporadores. El presente proyecto se desarrolló en el campo petrolífero Caño Limón, ubicado en el municipio de Arauquita, departamento de Arauca, Colombia.

Dicho campo fue nombrado por el Caño Agua de Limón, uno de los brazos que compone la cuenca del Río Arauca. Por otro lado, el trayecto del Oleoducto Caño Limón-Coveñas inicia desde el yacimiento petrolero hasta el puerto de Coveñas, Sucre (Colombia) en línea hasta la costa del Caribe Colombiano.

Figura 3. Zona de estudio departamento de Arauca

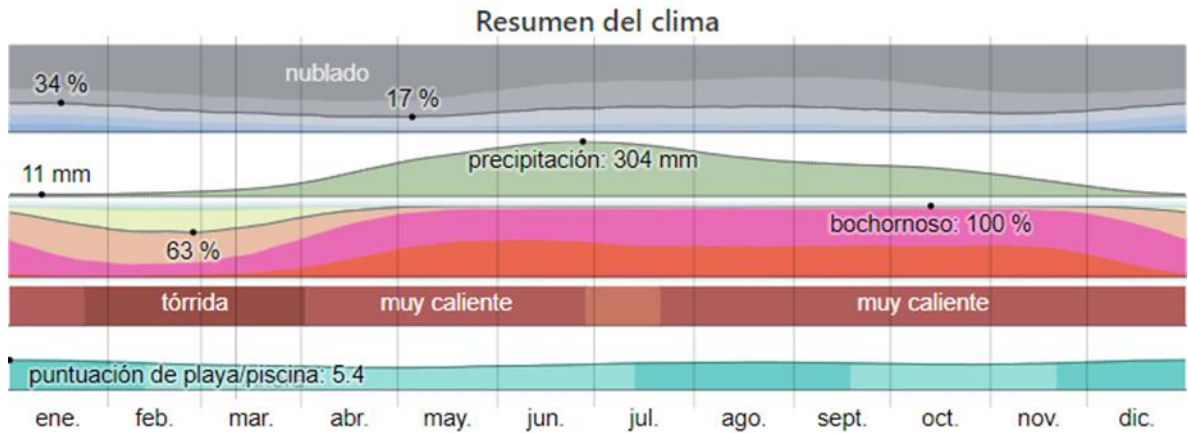


Fuente: INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Diagnóstico ambiental y lineamientos para el uso sostenible del área Caño Limón-Estéreo de Lipa. [En línea]. [julio de 2000]. Disponible en: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/011031/canolimon.pdf>

Las condiciones meteorológicas de esta zona fueron importantes para el proyecto, pues a partir de estas se estimaron algunas condiciones y parámetros para el diseño de este. “En Arauca, la temporada de lluvia es opresiva y nublada, la temporada seca es bochornosa y mayormente nublada y es muy caliente durante todo el año. Durante el transcurso del año, la temperatura generalmente varía de 22 °C a 36 °C y rara vez baja a menos de 21 °C o sube a más de 39 °C”⁶. En Gráfico 1 se resume el comportamiento climatológico en Arauca durante un año.

⁶ WEATHER SPARK. Clima promedio en Arauca, Colombia, durante todo el año. [En línea]. [s.f.]. Disponible en: <https://es.weatherspark.com/y/26641/Clima-promedio-en-Arauca-Colombia-durante-todo-el-a%C3%B1o>

Gráfico 1. Resumen del clima en Arauca

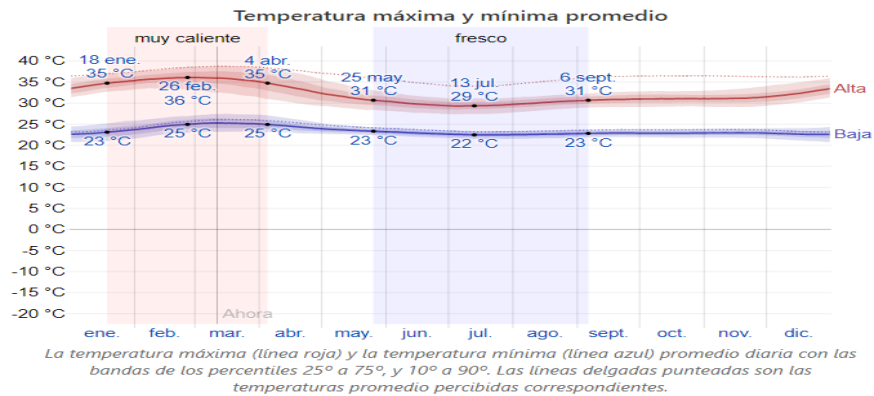


Fuente: WEATHER SPARK. Clima promedio en Arauca, Colombia, durante todo el año. [En línea]. [s.f.]. Disponible en: <https://es.weatherspark.com/y/26641/Clima-promedio-en-Arauca-Colombia-durante-todo-el-a%C3%B1o>, p. 1

La temporada calurosa dura 2,6 meses, del 18 de enero al 4 de abril, y la temperatura máxima promedio diaria es más de 35 °C. El día más caluroso del año es el 26 de febrero, con una temperatura máxima promedio de 36 °C y una temperatura mínima promedio de 25 °C. La temporada fresca dura 3,4 meses, del 25 de mayo al 6 de septiembre, y la temperatura máxima promedio diaria es menos de 31 °C. El día más frío del año es el 13 de julio, con una temperatura mínima promedio de 22 °C y máxima promedio de 29 °C.⁷

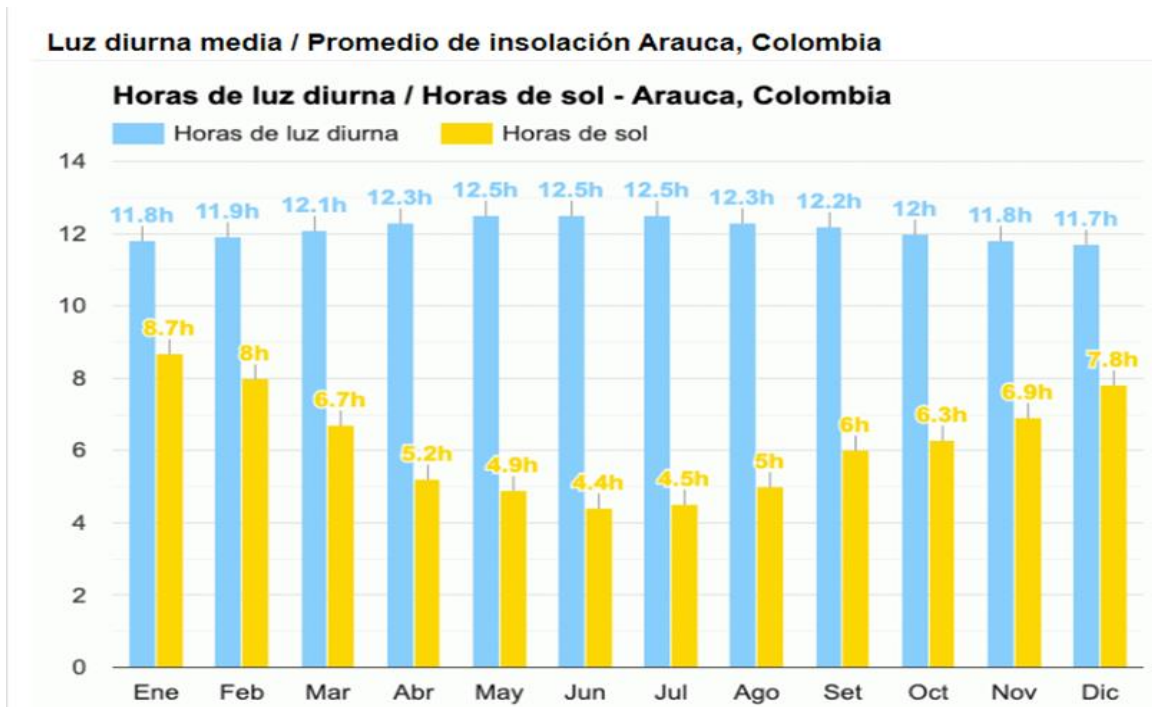
⁷ Ibíd., p. 1.

Gráfico 2. Temperatura máxima y mínima promedio en Arauca



Fuente: WEATHER SPARK. Clima promedio en Arauca, Colombia, durante todo el año. [En línea]. [s.f.]. Disponible en: <https://es.weatherspark.com/y/26641/Clima-promedio-en-Arauca-Colombia-durante-todo-el-a%C3%B1o>, p. 1

Gráfico 3. Horas de luz diurna y horas de sol en Arauca



Fuente: WEATHER SPARK. Clima promedio en Arauca, Colombia, durante todo el año. [En línea]. [s.f.]. Disponible en: <https://es.weatherspark.com/y/26641/Clima-promedio-en-Arauca-Colombia-durante-todo-el-a%C3%B1o>, p. 1

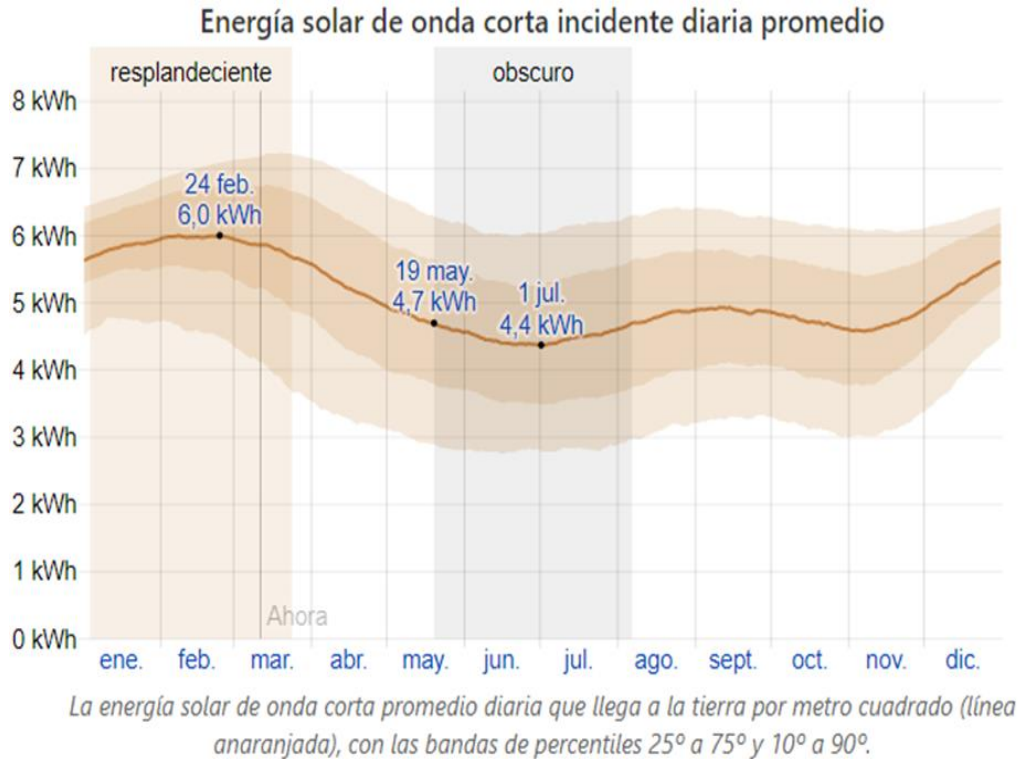
Por último, se habla de la “energía solar de onda corta incidente diario total que llega a la superficie de la tierra en un área amplia, tomando en cuenta las variaciones estacionales de la duración del día, la elevación del sol sobre el horizonte y la absorción de las nubes y otros elementos atmosféricos. La radiación de onda corta incluye luz visible y radiación ultravioleta”⁸.

La energía solar de onda corta incidente promedio diaria tiene variaciones estacionales leves durante el año. El periodo más resplandeciente del año dura 2,6 meses, del 3 de enero al 24 de marzo, con una energía de onda corta incidente diario promedio por metro cuadrado superior a 5,7 kWh. El día más resplandeciente del año es el 24 de febrero, con un promedio de 6,0 kWh. El periodo más obscuro del año dura 2,6 meses, del 19 de mayo al 6 de agosto, con una energía de onda corta incidente diario promedio por metro cuadrado de menos de 4,7 kWh. El día más obscuro del año es el 1 de julio, con un promedio de 4,4 kWh.⁹

⁸ Ibíd.

⁹ Ibíd.

Gráfico 4. Energía solar de onda cortar en Arauca



Fuente: WEATHER SPARK. Clima promedio en Arauca, Colombia, durante todo el año. [En línea]. [s.f.]. Disponible en: <https://es.weatherspark.com/y/26641/Clima-promedio-en-Arauca-Colombia-durante-todo-el-a%C3%B1o>, p. 1

1.3 SISTEMAS TERMODINÁMICOS

Los sistemas termodinámicos se clasifican en cerrados y abiertos. Un sistema cerrado es aquel que no presenta flujo de materia a través de sus límites. Por tanto, contiene una cantidad de materia constante. Un sistema abierto se caracteriza porque entra o sale materia a través de sus límites. En un sistema abierto, la cantidad de materia contenida puede permanecer constante si el régimen es estacionario o puede variar en casos de régimen transitorio. Obsérvese que la constancia de masa en un sistema no es condicionante para establecer si un sistema es abierto o cerrado.¹⁰

“Un caso especial de sistema cerrado es el llamado sistema aislado, concepto termodinámico muy importante. Un sistema aislado es un sistema cerrado que no presenta intercambio de energía con el medio. Dado que el medio no ejerce

¹⁰ LLORENS, Martín y MIRANDA, Ángel. Ingeniería Térmica. Barcelona: Marcombo, 2009, p. 2.

ninguna influencia sobre el sistema, recibe la denominación de “aislado”¹¹. Dentro de los sistemas termodinámicos nombrados anteriormente, se encuentran los sistemas de refrigeración, los cuales pertenecen a los sistemas cerrados, en tanto que no presentan flujo de materia a través de sus límites.

1.4 REFRIGERACIÓN

La refrigeración se define como el proceso de extracción de calor de una fuente de calor de baja temperatura, sustancia o medio de refrigeración y su transferencia a un disipador de calor de alta temperatura. La refrigeración mantiene la temperatura de la fuente de calor por debajo de la de su entorno mientras transfiere el calor extraído, y cualquier entrada de energía requerida, a un disipador de calor, aire atmosférico, o agua superficial.¹²

1.5 SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN

Los sistemas de refrigeración comúnmente utilizados para el aire acondicionado se pueden clasificar por el tipo de energía de entrada y el proceso de refrigeración como se expone a continuación.

1.5.1 Sistemas de compresión de vapor.

En los sistemas de compresión de vapor, los compresores activan el refrigerante comprimiéndolo a una presión más alta y un nivel de temperatura más alto después de que haya producido su efecto de refrigeración. El refrigerante comprimido transfiere su calor y se condensa en forma líquida. Este refrigerante líquido es entonces estrangulado a un vapor de baja presión y baja temperatura para producir un efecto refrigerante durante la evaporación. Los sistemas de compresión de vapor son los sistemas de refrigeración más ampliamente adoptados tanto en confort como en climatización de proceso.¹³

1.5.2 Sistemas de absorción.

En un sistema de absorción, el efecto de refrigeración es producido por la entrada de energía térmica. Después de absorber el calor del medio de refrigeración durante la evaporación, el refrigerante de vapor es absorbido por un medio absorbente. Esta solución se calienta entonces por horno de calentamiento directo, calor residual, agua caliente o vapor. El refrigerante

¹¹ *Ibíd.*

¹² WANG, Shan. *Refrigerants, refrigeration cycles, and refrigeration systems*. Segunda edición. New York: McGraw-Hill Education, 2001.

¹³ *Ibíd.*

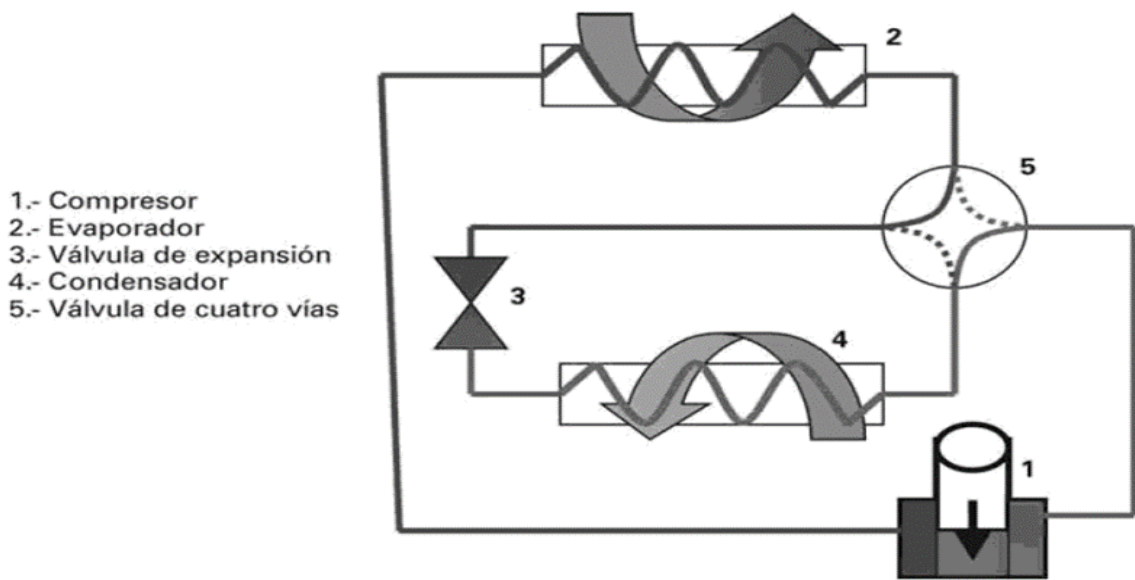
se vaporiza de nuevo y luego se condensa en líquido para comenzar de nuevo el ciclo de refrigeración.¹⁴

1.5.3 Sistemas de expansión de aire o gas.

En un sistema de expansión de aire o gas, el aire o gas se comprime a una alta presión mediante energía mecánica. Luego se enfría y se expande a baja presión. Debido a que la temperatura del aire o del gas baja durante la expansión, se produce un efecto de refrigeración¹⁵.

1.5.4 Bombas de calor. Una bomba de calor se define como una máquina termodinámica formada por un circuito frigorífico clásico, es decir, consta de un compresor, condensador, sistema de expansión y evaporador. De este circuito se aprovecha la energía calorífica cedida por el condensador (fluido caliente que sale del condensador) en vez de la energía proveniente del evaporador (fuente fría) del aire ambiente o del agua de un pozo o de un río.

Figura 4. Esquema de funcionamiento de una bomba de calor



Fuente: MARTÍNEZ, Francisco y VELASCO, Eloy. Bombas de calor y energías renovables en edificios. New York: Thomson, 2005.

En estos intercambios intervienen los calores latentes de evaporación y condensación del fluido frigorífero utilizado¹⁶. Durante la evaporación, la energía es sustraída del medioambiente en forma con el fin de ser absorbida por el fluido

¹⁴ Ibíd.

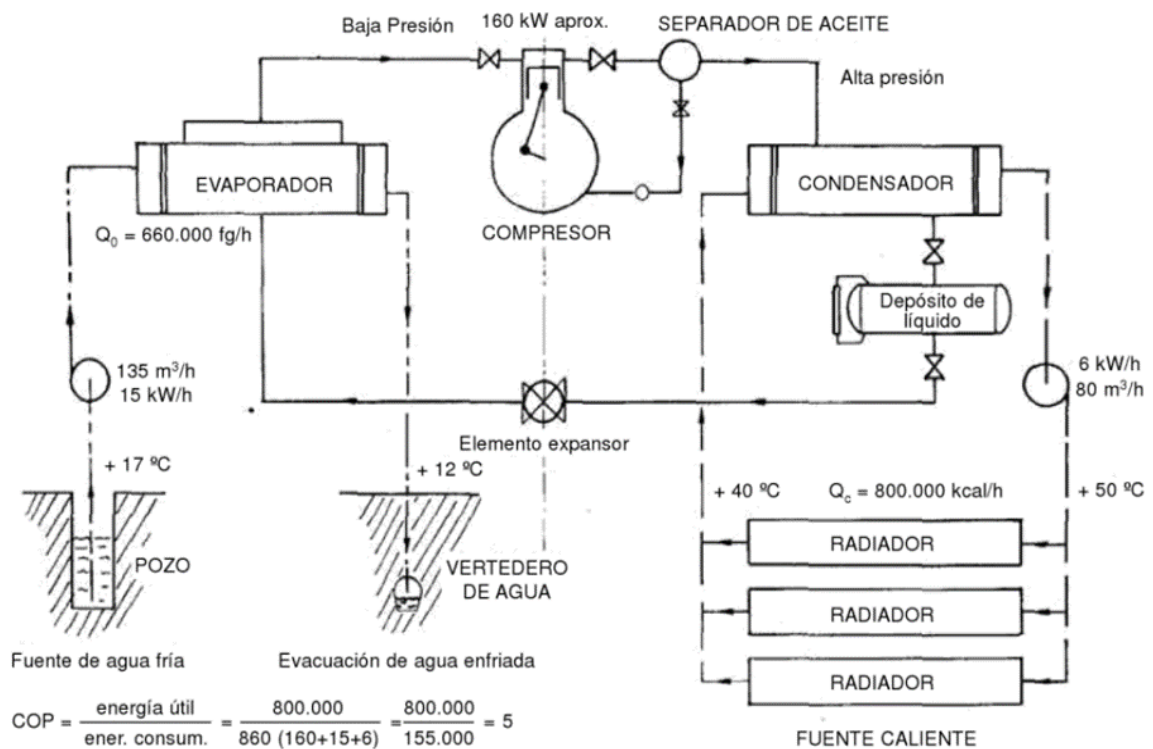
¹⁵ Ibíd.

¹⁶ MARTÍNEZ, Francisco y VELASCO, Eloy. Bombas de calor y energías renovables en edificios. New York: Thomson, 2005.

frigorífero a temperatura constante, para así pasar del estado líquido al gaseoso a presión constante. Mientras tanto, en la condensación la energía es liberada hacia el medio que se quiere calentar, pasando así el fluido frigorífero del estado de vapor al estado líquido y a una temperatura constante.

De esta manera, el calor total cedido por el condensador será igual al calor absorbido por el evaporador en el foco frío más el calor resultante de la transformación del trabajo mecánico realizado por el compresor que se transforma en calor. En la Figura 5 se expone el principio de funcionamiento de una bomba de calor agua-agua, tomando como fuente fría una capa de agua subterránea (geotérmica).

Figura 5. Esquema de bomba de calor agua-agua



Fuente: MARTÍNEZ, Francisco y VELASCO, Eloy. Bombas de calor y energías renovables en edificios. New York: Thomson, 2005.

El fluido frigorífero, por lo general, es un fluido con un alto calor latente para ser evaporado en el evaporador y luego aspirado en estado gaseoso por el compresor. Dicho compresor es quien comprime este gas para luego ser condensado. En el condensador el gas se licúa y libera una cantidad de calor Q_c . A la salida del condensador, el líquido se dirige a un sistema de expansión, convirtiéndose en vapor húmedo. Este vapor regresa al evaporador con una presión inferior a la de licuefacción y para evaporarse absorbe una cantidad de calor Q_0 .

Asimismo, el interés de la bomba de calor reside en que la cantidad de energía consumida que hace girar el compresor (normalmente con un motor eléctrico) es pequeña en comparación con la cantidad de energía desprendida por el condensador y, en consecuencia, recibida por el medio que interesa calentar.

1.6 ELEMENTOS QUE COMPONEN UNA BOMBA DE CALOR

Los elementos que componen una bomba de calor por compresión mecánica se nombran a continuación.

1.6.1 Compresor. El compresor es el elemento que más cuidado requiere en la instalación, siendo objeto de inspecciones sistemáticas. Además, es el único elemento que necesita del consumo de energía mecánica para su funcionamiento. Su función principal consiste en aumentar la presión del evaporador hasta tal punto que se dé el paso de estado gas a líquido en el condensador. Aunque se espera un ciclo isentrópico en el compresor, el aumento de presión va de la mano con el aumento de temperatura. Los compresores pueden ser clasificados de la siguiente manera:

- **Compresores herméticos.**

El motor y el compresor, además de compartir el eje, se alojan en la misma envolvente, con lo que la recuperación del calor generada en el motor mediante el fluido refrigerante es mayor. Para bombas de calor eléctricas con potencias inferiores a 60-70 kW se utilizan compresores herméticos¹⁷.

¹⁷ Ibíd.

Imagen 1. Compresor hermético



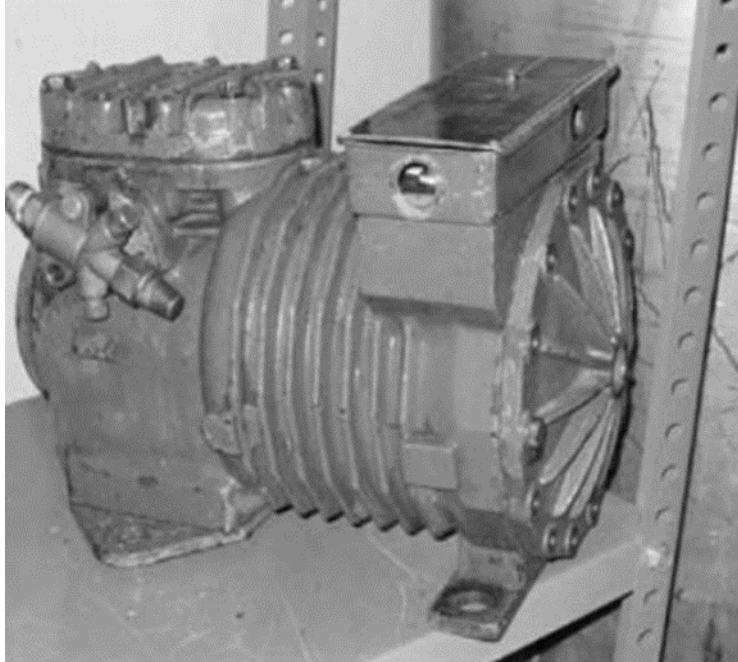
Fuente: MARTÍNEZ, Francisco y VELASCO, Eloy. Bombas de calor y energías renovables en edificios. New York: Thomson, 2005.

- **Compresores semiherméticos.**

El motor y compresor comparten eje. Parte del calor generado en el motor se recupera en el fluido refrigerante, con lo que el rendimiento es superior al de los abiertos. Para potencias medias (normalmente bombas de calor aire-gua) se utilizan compresores semiherméticos¹⁸.

¹⁸ Ibíd.

Imagen 2. Compresor semihermético



Fuente: MARTÍNEZ, Francisco y VELASCO, Eloy. Bombas de calor y energías renovables en edificios. New York: Thomson, 2005.

- **Compresores abiertos.**

El motor de accionamiento y el compresor son independientes. El motor y el compresor pueden estar acoplados por correas, o por acoplamiento directo montando el motor sobre el cigüeñal. Para los grandes compresores, esto es, de potencias altas, se utilizan compresores abiertos. Son para aplicaciones aisladas y nunca en equipos de serie¹⁹.

¹⁹ Ibíd.

Imagen 3. Compresor abierto acoplado por correas



Fuente: MARTÍNEZ, Francisco y VELASCO, Eloy.
Bombas de calor y energías renovables en edificios.
New York: Thomson, 2005

- **Compresores de desplazamiento cinético o compresores centrífugos.**

Estos pueden ser de flujo radia o axial y suelen tener varias etapas, de manera que se consiguen grandes saltos de presión, destinándose a equipos de gran potencia. Su aplicación está indicada en sistemas con necesidades entre 580 y 1.200 kW²⁰.

- **Compresores volumétricos o de desplazamiento positivo.** Estos compresores pueden ser rotativos, alternativos, de tornillo o de membrana.

- **Compresores rotativos.**

Se basan en el giro de un cilindro contenido en el interior de otro cilindro hueco. Se llena un volumen de vapor refrigerante y, mediante rotación, este se va disminuyendo, aumentándose la presión²¹.

²⁰ Ibíd.

²¹ Ibíd.

Figura 6. Compresor rotativo



Fuente: MARTÍNEZ, Francisco y VELASCO, Eloy. Bombas de calor y energías renovables en edificios. New York: Thomson, 2005

• **Compresores de espiral o scroll.** Estos compresores tienen dos piezas en forma de espiral, una fija y una móvil, según un desplazamiento curvilíneo.

1.6.2 Condensador.

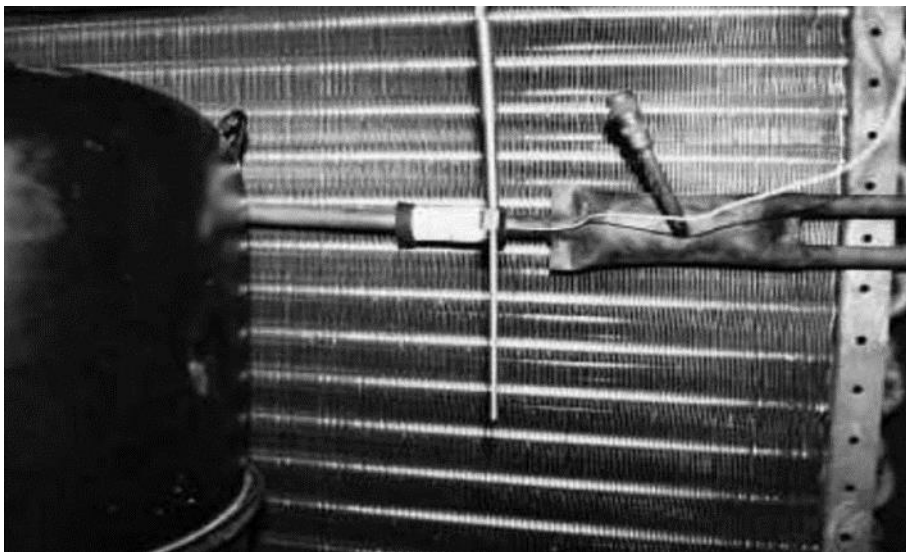
Un condensador es un intercambiador de calor. El refrigerante proveniente del compresor en estado de vapor sobrecalentado, y a una temperatura elevada cede calor al medio que se desea calentar. En esta baja de temperatura produce la condensación del fluido frigorífico. Dicha transferencia puede ser mejorada al usar tubos aleteados²².

Así, por ejemplo, cuando se tiene agua de refrigeración, los condensadores más utilizados son los de placa o de tubo y coraza. Para los de tubo y coraza, cuando el fluido se condensa va por el lado de la carcasa y se dominan condensadores inundados. Su clasificación se encuentra establecida de acuerdo con el medio al que ceden la energía calorífica:

• **Condensadores enfriados por aire.** Estos suelen ser de tubo de cobre con aletas de aluminio para incrementar la transferencia de calor. Adicional a esto, sus baterías disponen de ventiladores que promueven la circulación del aire que se desea calentar entre las aletas del condensador; estos son los condensadores de tipo convección forzada.

²² Ibíd.

Imagen 4. Condensadores enfriados por aire



Fuente: MARTÍNEZ, Francisco y VELASCO, Eloy. Bombas de calor y energías renovables en edificios. New York: Thomson, 2005

- **Condensadores de agua fría.** El coeficiente de película de un líquido suele ser superior a la de un gas, por este motivo, los condensadores de agua fría tienen una mejor transferencia de calor que los enfriados por aire. Este sistema es aplicado para casos donde la cantidad de agua disponible será suficiente. Existe una variedad de tipos de condensadores enfriados por agua, entre estos se encuentran los de doble tubo en contracorriente, los multitubulares horizontales, los de inmersión y los de placa, siendo estos últimos los más empleados en la actualidad.

1.6.3 Dispositivo de expansión. Este dispositivo es el encargado de separar el lado de alta presión del de baja presión. Así como regula el flujo de refrigerante hacia el evaporador, también reduce la presión del líquido refrigerante de forma isoentálpica. Estos se pueden clasificar de la siguiente manera:

- **Tubo capilar.** Consiste en un tubo de diámetro interior muy pequeño de 0,6 a 2,3 mm, y de 0,5 a 5 metros de longitud. Este sistema es para máquinas de potencia reducida y constante²³. En este se presenta una pérdida de presión como consecuencia de la fricción al pasar el refrigerante a través del tubo capilar. Las ventajas del tubo capilar son su sencillez, bajo coste y la ausencia de partes móviles. Entre sus desventajas está, por ejemplo, el no poder ser regulado una vez el sistema ha sido instalado y el no poder modular variaciones de carga.

²³ Ibíd.

Imagen 5. Tubo capilar



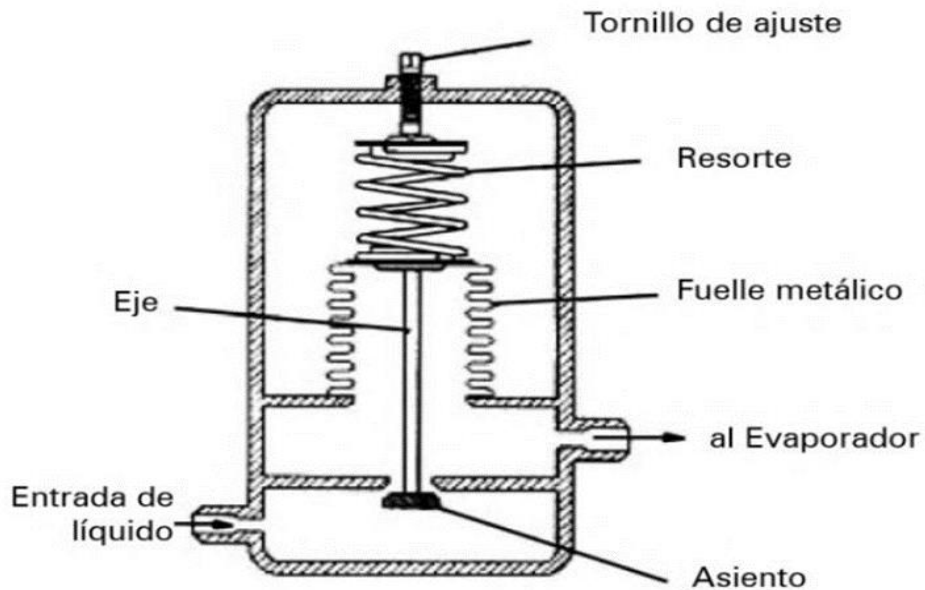
Fuente: MARTÍNEZ, Francisco y VELASCO, Eloy. Bombas de calor y energías renovables en edificios. New York: Thomson, 2005

- **Válvula de expansión constante o automática.**

Esta mantiene una presión constante a la salida de esta. Consiste en un diafragma, un muelle de control regulable y un sistema de aguja y asiento. Esta válvula toma como referencia la presión del vapor. Cuando cae por debajo del punto de control, se abre dejando paso al refrigerante. Por el contrario, cuando la presión del evaporador sube por encima de este punto, la válvula se cierra. Por lo tanto, el sistema equilibra la fuerza del muelle y la ejercida por la presión del evaporador²⁴.

²⁴ Ibíd.

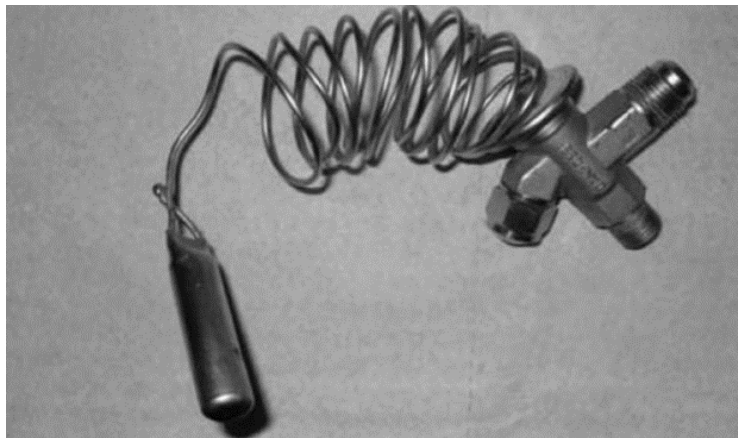
Figura 7. Válvula de expansión constante o automática



Fuente: MARTÍNEZ, Francisco y VELASCO, Eloy. Bombas de calor y energías renovables en edificios. New York: Thomson, 2005

- **Válvula de expansión termostática.** Es el dispositivo más usado, puesto que varía el flujo de refrigerante que entra al evaporador con la temperatura del refrigerante en estado gaseoso a la salida de este.

Imagen 6. Válvula de expansión termostática



Fuente: MARTÍNEZ, Francisco y VELASCO, Eloy. Bombas de calor y energías renovables en edificios. New York: Thomson, 2005

1.6.4 Evaporadores.

La transferencia de calor, desde un punto de vista práctico, se lleva a cabo de un sistema a otro mediante una sustancia determinada, excepto en el caso de la transmisión de calor por radiación. El dispositivo en el que se lleva a cabo la transferencia de calor de un sistema a otro recibe el nombre de intercambiador de calor.

De esa manera, los evaporadores, los condensadores y los generadores de vapor forman una categoría especial de intercambiadores en los que uno de los fluidos cambia de estado. Los evaporadores y condensadores son piezas clave en los ciclos de refrigeración por compresión de vapor y absorción²⁵.

1.7 CLASIFICACIÓN DE LOS EVAPORADORES

En la actualidad, existe una amplia gama de evaporadores. Por esta razón, es difícil caracterizarlos en un solo grupo, por lo cual se identificaron según el estado del refrigerante en su interior, según su construcción y capacidad de enfriamiento de líquidos.

1.7.1 Según el estado de refrigerante en su interior

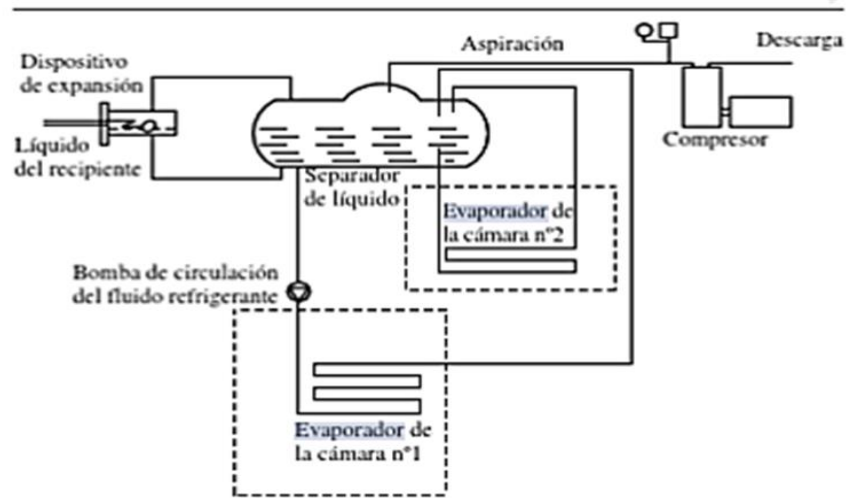
- **Inundados.**

En estos evaporadores, el fluido refrigerante se encuentra en estado líquido desde la entrada hasta la salida, aunque a la salida está en mezcla de líquido y gas; pero en un porcentaje considerable de líquido. Es decir, el fluido refrigerante se encuentra a lo largo de toda la superficie de transmisión, en estado líquido. Son evaporadores de gran rendimiento, ya que, si a la salida el fluido está en un porcentaje considerable de líquido, implica que la diferencia de temperaturas entre el fluido refrigerante y el medio a enfriar es prácticamente constante. También se caracterizan por el tipo de dispositivo de expansión, ya que emplean los denominados reguladores de nivel o válvula de flotador.²⁶

²⁵ LLORENS, Martín y MIRANDA, Ángel. Op. cit.

²⁶ FRANCO, Juan. Manual de refrigeración. Barcelona: Editorial Reverté, 2012, p. 104.

Figura 8. Evaporador inundado



Fuente: FRANCO, Juan. Manual de refrigeración. Barcelona: Editorial Reverté, 2012, p. 105

- **Semiinundados.**

Están formados por dos colectores, uno de menor diámetro que es la entrada del fluido refrigerante, y otro colector de mayor diámetro, que es la salida del fluido. Los dos colectores están unidos mediante los tubos, en paralelo, por los que circula el fluido refrigerante. Es muy importante para su correcto funcionamiento que estos evaporadores estén perfectamente nivelados. Al estar los tubos conectados en paralelo, la velocidad del fluido refrigerante a través de los mismos es muy baja y el líquido se va depositando en la parte inferior de los tubos, inundándolos. El vapor que se va formando circula por la parte superior. Por lo general, estos evaporadores son de tubo con aletas, que en el gráfico no están representadas, con objeto de ver la disposición de los tubos y colectores.²⁷

²⁷ Ibid., p. 105

Figura 9. Evaporadores semiinundados



Fuente: FRANCO, Juan. Manual de refrigeración. Barcelona: Editorial Reverté, 2012, p. 105

- **Secos.**

Se caracterizan porque el fluido refrigerante se encuentra, a la salida del evaporador, en estado de gas. Es decir, una parte de la superficie de transmisión se emplea en el recalentamiento del fluido refrigerante. En los evaporadores secos la alimentación se produce, generalmente, mediante válvulas de expansión termostáticas. El fluido entra expansionado y a la salida, por la transmisión de calor, se encuentra en estado de vapor. Esto es debido a que las válvulas de expansión termostáticas trabajan según el recalentamiento del vapor a la salida del evaporador.²⁸

1.7.2 Según su construcción

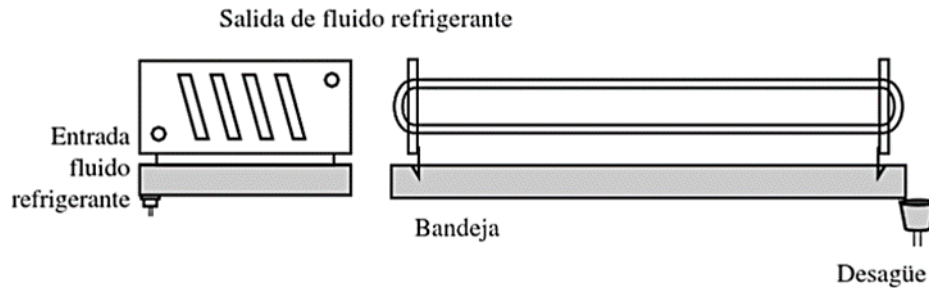
- **Tubos lisos.**

“Son los más empleados desde el principio de la refrigeración. Consisten en un tubo de cobre recocado que puede presentar distintas formas, entre las que destacan, por su aplicación, la de zigzag y en espiral”²⁹.

²⁸ *Ibíd.*, p. 106

²⁹ *Ibíd.*

Figura 10. Evaporador de tubos lisos

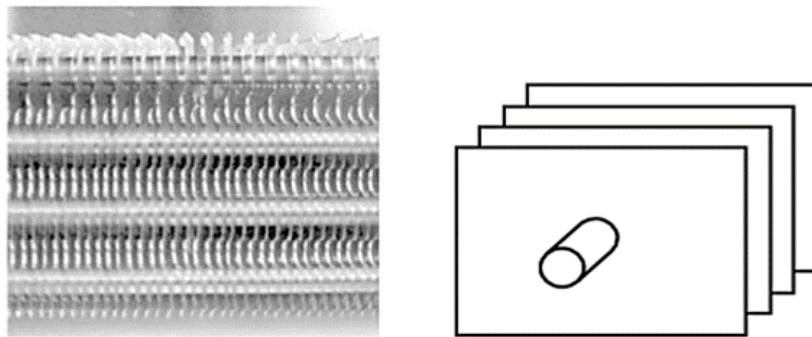


Fuente: FRANCO, Juan. Manual de refrigeración. Barcelona: Editorial Reverté, 2012, p. 106

- **Tubo con aletas**

Para una misma capacidad, con las aletas se consigue un menor tamaño porque la superficie de transmisión es la de los tubos más la de las aletas. Las aletas pueden ser de varias formas, principalmente rectangulares o circulares, y no necesariamente lisas con objeto de facilitar la turbulencia del aire. Las aletas se fijan al tubo mediante un proceso mecánico, que consiste en el ensanchamiento del tubo haciendo pasar por su interior una bola de acero³⁰.

Figura 11. Evaporador de tubo con aletas



Fuente: FRANCO, Juan. Manual de refrigeración. Barcelona: Editorial Reverté, 2012, p. 107

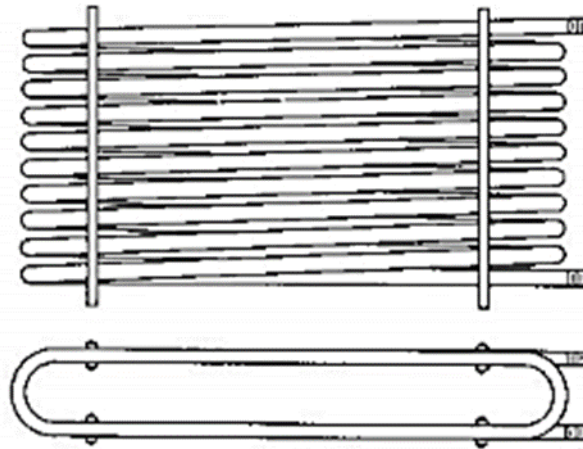
- **Tubo descubierto**

Los evaporadores de tubo descubierto por lo general se construyen de tubo de acero o de tubo de cobre. El tubo de acero se usa en evaporadores grandes y en evaporadores que trabajan con amoníaco, mientras que los de tubo de cobre se utilizan en la fabricación de evaporadores pequeños y

³⁰ Ibíd., p. 107

se les usa con refrigerante que no sea amoníaco. Los evaporadores de tubo descubierto se fabrican en gran número de tamaños, forma y diseños, y, es muy común que sean fabricados a la medida según cada caso específico³¹.

Figura 12. Evaporador de tubo descubierto



Fuente: DOSSAT, Roy. Principios de Refrigeración. México: CECSA, 2001

1.7.3 Enfriamiento de líquidos

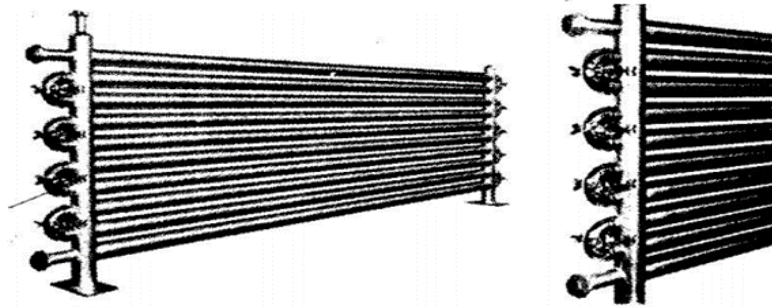
- **Doble tubo**

“El enfriador de doble tubo comprende dos tubos arreglados, de tal modo que un tubo queda en el interior del otro. El fluido enfriado circula en una dirección a través del tubo interior, mientras que el refrigerante fluye en dirección opuesta por el espacio anular comprendido entre los dos tubos. Los enfriadores de doble tubo pueden ser trabajados con expansión seca o inundados”³².

³¹ DOSSAT, Roy. Principios de refrigeración. México: CECSA, 2001.

³² HOSTELERÍA10.COM. Enfriadores de líquidos y barriles. [En línea]. [s.f.]. Disponible en: <https://hosteleria10.com/frio/enfriadores-de-liquidos/>, p. 1.

Imagen 7. Evaporador de doble tubo.



Fuente: DOSSAT, Roy. Principios de Refrigeración.
México: CECSA, 2001

- **Enfriador Baudelot.**

El enfriador Baudelot consiste en una serie de tubos horizontales los cuales están localizados uno debajo del otro y unidos entre sí para formar un circuito o varios circuitos de refrigerante. Ya sea con funcionamiento de expansión seca o inundada, el refrigerante circula por el interior de los tubos mientras que el líquido a enfriarse fluye como una película delgada sobre el exterior de los mismos. El líquido fluye bajando sobre los tubos por la acción de la gravedad desde un distribuidor localizado en la parte alta del enfriador y es recogido en la parte inferior.³³

³³ Ibíd.

Imagen 8. Evaporador Baudelot



Fuente: COLMACCOIL. Evaporadores exclusivos – enfriadores Baudelot. [En línea]. [s.f.]. Disponible en: <http://www.colmaccoil.com/es/productos/evaporadores-de-refrigeracion/evaporadores-exclusivos/enfriadores-baudelot.aspx>

- **Tipo tanque.**

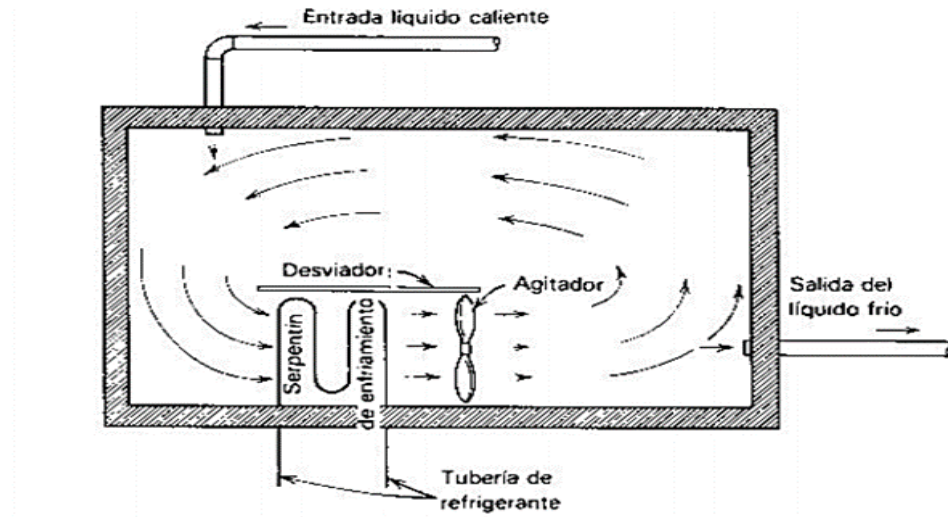
El enfriador de tipo tanque consiste esencialmente en un serpentín refrigerante de tubo descubierto instalado en el centro o a un lado de un tanque de acero largo en cual contiene el líquido enfriado. Aunque el serpentín refrigerante está completamente sumergido en el líquido enfriado, está separado del líquido mediante un arreglo de desviadores, un motor le da el movimiento al agitador, el cual es utilizado para hacer circular el líquido enfriado sobre el serpentín enfriador a velocidades relativamente altas.³⁴

Cabe mencionar que los enfriadores tipo tanque pueden usarse para cualquier aplicación de enfriamiento líquido, donde la salubridad no es un factor importante y son muy utilizados para enfriamiento de agua, salmuera y otros líquidos usados como refrigerantes secundarios³⁵.

³⁴ Ibíd.

³⁵ Ibíd.

Figura 13. Evaporador tipo tanque



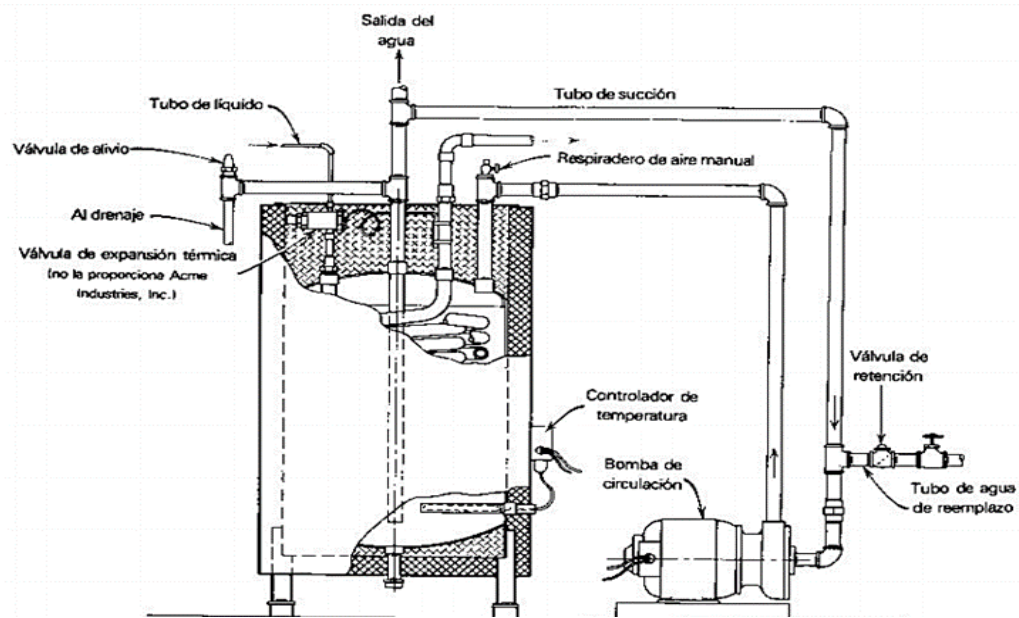
Fuente: DOSSAT, Roy. Principios de refrigeración. México: CECSA, 2001

- **Serpentín en casco.**

El enfriador con serpentín en casco por lo general es construido por uno o más serpentines de tubo descubierto doblado en forma de espiral, el cual se encuentra encerrado en un casco de acero soldado. Por regla general, el serpentín trabaja con expansión seca con el refrigerante por dentro del tubo del serpentín y el líquido a enfriarse en el casco. Generalmente se usa para enfriamiento de agua de bebederos y en otras aplicaciones donde la higiene es muy importante: panaderías y laboratorios fotográficos.³⁶

³⁶ Ibíd.

Figura 14. Evaporador tipo serpiente en casco



Fuente: DOSSAT, Roy. Principios de refrigeración. México: CECSA, 2001

- **Acorazado.**

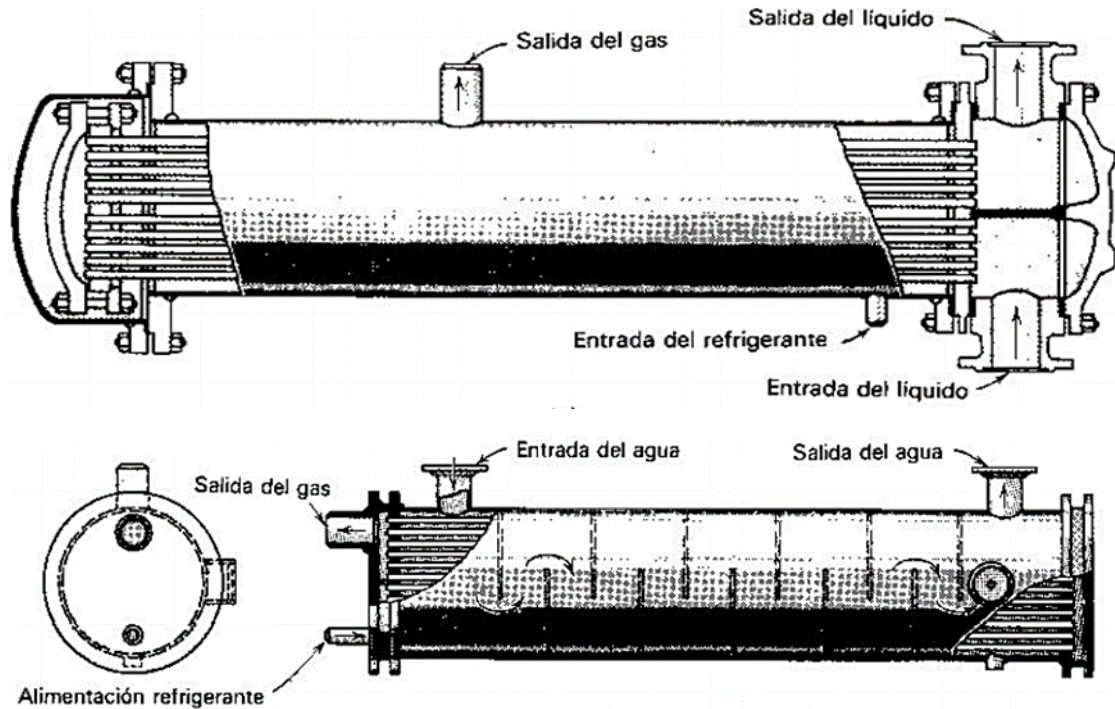
Los enfriadores acorazados tienen una eficiencia relativamente alta, requieren un mínimo de espacio en el piso y poca altura del cuarto, su mantenimiento es sencillo y fácilmente se adaptan fácilmente a todos los casos de enfriamiento de líquido. Por estas razones el enfriador acorazado es el de uso más generalizado. Aun cuando hay algunas diferencias en el diseño dependiendo del refrigerante que se vaya a usar y si el evaporador se usa con expansión seca o inundada.³⁷

“El enfriador acorazado consiste esencialmente de un casco cilíndrico de acero en el cual se tiene un determinado número de tubos rectos paralelos y colocados en cabezales de tubo en sus extremos. Cuando en enfriador trabaja con expansión seca el refrigerante pasa por el interior de los tubos mientras que el líquido a enfriar circula a través del casco”³⁸.

³⁷ Ibíd.

³⁸ SERVICE REFRIGERACIÓN. Todo sobre los enfriadores líquidos – Chillers. [En línea]. [2017]. Disponible en: <https://servicerefrigeracion.com.ar/2018/05/17/todo-sobre-enfriadores-liquidos-chillers/#:~:text=El%20enfriador%20acorazado%20consiste%20en,que%20el%20l%C3%ADquido%20a%20enfriar>

Figura 15. Evaporador tipo acorazado



Fuente: DOSSAT, Roy. Principios de refrigeración. México: CECSA, 2001

1.8 REFRIGERANTE.

Los ciclos termodinámicos de refrigeración requieren un fluido de trabajo que recibe el nombre de *fluido frigorífico*, *refrigerante* o *frigorígeno*. Es evidente que según la naturaleza del ciclo (compresión, absorción y ciclos de gas) se consideran más o menos aptas diferentes sustancias químicas

En esencia un frigorígeno debe ser una sustancia química (o una mezcla de sustancias) que se evapore a baja presión y condense a alta presión, procurando que la diferencia de presiones no sea excesiva. Esta última condición es necesaria para evitar una potencia de compresión muy elevada que encarezca el proceso.³⁹

³⁹ MIRANDA, Ángel. Manual técnico de refrigerantes. Barcelona: Marcombo, 2012, p. 23.

1.8.1 Propiedades. Cuando se expusieron las propiedades de los refrigerantes, se hizo referencia a las relacionadas con su comportamiento como fluidos frigoríficos. El estudio de estas propiedades es esencial para comprender el funcionamiento de un ciclo frigorífico y también para elegir correctamente el refrigerante más adecuado en cada aplicación.

Propiedades físicas

- Masa molecular.
- Densidad.
- Viscosidad.
- Conductividad.
- Calor específico.
- Calor latente de vaporización.
- Tensión superficial.

Propiedades químicas

- Inflamabilidad.
- Toxicidad y seguridad.
- Compatibilidad con los lubricantes.
- Compatibilidad con la carga.
- Compatibilidad con los materiales.
- Estabilidad.

Propiedades físicas y termodinámicas

- Relación presión-temperatura para el estado de saturación (curva de tensión de vapor).
- Volumen específico, entalpía y entropía para el estado de saturación y para el vapor recalentado.
- Punto de congelación.
- Punto de ebullición.
- Propiedades críticas: presión, temperatura, densidad.
- Relación potencia-caudal.

- Coeficiente de eficacia.

Propiedades medioambientales

Se trata de propiedades que ponen de manifiesto la interacción del refrigerante con el medio ambiente como, por ejemplo:

- Efecto sobre la capa de ozono.
- Efecto invernadero.

1.8.2 Normativa.

La Unidad Técnica Ozono (UTO), está encargada del diseño e implementación de las estrategias de eliminación y consumo de sustancias agotadoras de ozono (SAO), con el fin de dar cumplimiento a los compromisos adquiridos por Colombia ante el Protocolo de Montreal. Trabaja bajo la supervisión del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) como implementador, con el apoyo de las agencias implementadoras tales como PNUD, PNUMA, ONUDI y Banco Mundial y con recursos del Fondo Multilateral del Protocolo de Montreal.⁴⁰

“El marco normativo es la parte fundamental que soporta las estrategias planteadas y adelantadas por la UTO en términos de control de importaciones, exportaciones, usos, aprobación de enmiendas y establecimiento de mecanismos de control y seguimiento para las actividades relacionadas con las SAO”⁴¹.

1.8.3 Clasificación.

“La nomenclatura de los refrigerantes corresponde a algunas características de su origen las cuales conforman las series que se conocen universalmente, tal como se muestra a continuación en la tabla de la clasificación del estándar 34 de la Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado –ASHRAE”⁴².

⁴⁰ MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Unidad Técnica Ozono – UTO. [En línea]. [2020]. Disponible en: <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/604-plantilla-asuntos->, p. 1.

⁴¹ MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Legislación. [En línea]. [2020]. Disponible en: <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article?id=197:plantilla-asuntos-ambientales-y-sectorial-y-urbana-sin-galeria-13>, p. 1.

⁴² MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Manual de buenas prácticas en refrigeración. [En línea]. [2014]. Disponible en: <http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/Manual-Buenas-Practicas-Refrigeraci%C3%B3n.pdf>, p. 13.

Tabla 1. Tabla de clasificación de refrigerantes

Serie	Nombre	Refrigerante
000	Metanos	R12, R23
100	Etanos	R134a, R141b
200	Propanos	R290
400	Zeotropos	R407C, R410A
500	Azeotropos	R502, R507
600	Orgánicos	R600, R600a
700	Inorgánicos	R717, R744

Fuente: MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Manual de buenas prácticas en refrigeración. [En línea]. [2014]. Disponible en: <http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/Manual-Buenas-Practicas-Refrigeraci%C3%B3n.pdf>, p. 13

A continuación, en la Tabla 2 se presentan los refrigerantes Clorofluorocarbonados o CFC eliminados por la UTO en Colombia bajo el cumplimiento del Protocolo Montreal.

Tabla 2. Refrigerantes CFC eliminados por la UTO

Número R	Componentes	PAO	PCG ³	Seguridad
R11	CFC-11	1	4.750	A1
R113	CFC-113	1	6.,130	A1
R114	CFC-114	1	10.040	A1
R115	CFC-115	0,44	7.370	A1
R12	CFC-12	1	10.890	A1
R13	CFC-13	1	14.420	A1
R400	R12/R114 (50/50)	1	10.000	A1
R500	R12/R152a (73,8/26,2)	0,738	8.100	A1
R502	R22-R115 (48,8/51,2)	0,25	4.700	A1
R503	R23/R13 (40,1/59,9)	0,599	15.000	A1

Fuente: MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Manual de buenas prácticas en refrigeración. [En línea]. [2014]. Disponible en: <http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/Manual-Buenas-Practicas-Refrigeraci%C3%B3n.pdf>, p. 19

De esta manera, bajo ciertos parámetros estipulados en el Protocolo Montreal y Kioto, la UTO controla ciertos tipos de refrigerantes que actualmente siguen en uso en ciertos campos industriales en Colombia. Estos se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. HCFC “Hidroclorofluorocarburos”

Número R	Componentes	PAO	PCG ⁴	Seguridad
R123	HCFC-123	0,02	77	B1
R124	HCFC-124	0,02	609	A1
R142b	HCFC-142b	0,07	2.310	A2
R22	HCFC-22	0,05	1.810	A1

Fuente: MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Manual de buenas prácticas en refrigeración. [En línea]. [2014]. Disponible en:

<http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/Manual-Buenas-Practicas-Refrigeraci%C3%B3n.pdf>, p. 20

Tabla 4. HFC “Hidrofluorocarburos”

Número R	Componentes	PAO	PCG ⁵	Seguridad
R125	HFC-125	0	3.500	A1
R134a	HFC-134a	0	1.430	A1
R143a	HFC143a	0	4.470	A2
R152a	HFC-152a	0	124	A2
R161	HFC-161	0	12	
R227ea	HFC-227ea	0	3.220	A1
R23	HFC-23	0	14.760	A1
R236ea	HFC-236ea	0	1.370	
R236fa	HFC-236fa	0	9.810	A1
R245fa	HFC-245fa	0	1.30	B1
R32	HFC-32	0	675	A2

Fuente: MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Manual de buenas prácticas en refrigeración. [En línea]. [2014]. Disponible en:

<http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/Manual-Buenas-Practicas-Refrigeraci%C3%B3n.pdf>, p. 20

Tabla 5. Mezclas de HFC “Hidrofluorocarburos”

Número R	Componentes	PAO	PCG ⁸	Seguridad
R404A	R125/R143a/R134a (44,0/52,0/4,0)	0	3.900	A1
R407A	R32/R125/R134a (20,0/40,0/40,0)	0	2.100	A1
R407B	R32/R125/R134a (10,0/70,0/10,0)	0	2.800	A1
R407C	R32/R125/R134a (23,0/25,0/52,0)	0	1.800	A1
R407D	R32/R125/R134a (15,0/15,0/70,0)	0	1.600	A1
R407E	R32/R125/R134a (25,0/15,0/60,0)	0	1.600	A1
R410A	R32/R125 (50,0/50,0)	0	2.100	A1
R413A	R218/R134a/R600a (9,0/88,0/3,0)	0	2.100	A1
R417A	R125/R134a/R600a (46,6/50,0/3,4)	0	2.300	A2
R419A	R125/R134a/R170 (77,0/19,0/4,0)	0	3.000	A2
R421A	R125/R134a (58,0/42,0)	0	2.600	A1
R421B	R125/R134a (85,0/15,0)	0	3.200	A1
R422A	R125/R134a/R600a (85,1/11,5/3,4)	0	3.100	A2
R422B	R125/R134a/R600a (55,1/42,0/3,0)	0	2.500	A2
R422C	R125/R134a/R600a (82,0/15,0/3,0)	0	3.100	A2
R422D	R125/R134a/R600a (65,1/31,5/3,4)	0	2.700	A1
R423A	R134a/R227ea (52,5/47,5)	0	2.300	A2
R424A	R125/R134a/R600a/R600/601a (50,5/47,0/0,9/1,0/0,6)	0	2.400	A2
R425A	R32/R134a/R227ea (18,5/69,5/12,0)	0	1.500	A2
R426A	R125/R134a/R600/R601a (5,1/93,0/1,3/0,6)	0	1.500	A1
R427A	R32/R125/R143a/R134a (15,0/25,0/10,0/50,0)	0	2.100	A2
R428A	R125/R143a/R290/R600a (77,5/20,0/0,6/1,9)	0	3.600	A2
R429A	RE170/R152a/R600a (60,0/10,0/30,0)	0	20	A3
R430A	R152a/R600a (76,0/24,0)	0	110	A3
R431A	R290/R152a (71,0/29,0)	0	53	A3
R434A	R125/R143a/R134a/R600a (63,2/18,0/16,0/2,8)	0	3.100	A2
R435A	RE170/R152a (80,0/20,0)	0	27	A3
R437A	R125/R134a/R600/R601 (19,5/78,5/1,4/0,6)	0	1.700	A1
R507A	R125/R143a (50,0/50,0)	0	3.800	A2
R508A	R23/R116 (39,0/61,0)	0	13.000	A1
R508B	R23/R116 (46,0/54,0)	0	13.000	A1

Fuente: MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Manual de buenas prácticas en refrigeración. [En línea]. [2014]. Disponible en: <http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialUrbana/Manual-Buenas-Practicas-Refrigeraci%C3%B3n.pdf>, p. 23

Por otra parte, se hallaron algunas alternativas de mezclas de HCFC, controladas por el Protocolo Montreal:

Tabla 6. Mezclas alternativas de HCFC

Número R	Componentes	PAO	PCG ⁷	Seguridad
R401A	R22/R152a/R124 (53,0/13,0/34,0)	0,033	1,200	A1
R401B	R22/R152a/R124 (61,0/11,0/28,0)	0,036	1.300	A1
R401C	R22/R152a/R124 (33,0/15,0/52,0)	0,027	930	A1
R402A	R125/R290/R22 (60,0/2,0/38,0)	0,019	2.800	A1
R402B	R125/R290/R22 (38,0/2,0/60,0)	0,03	2.400	A1
R403A	R290/R22/R218 (5,0/75,0/20,0)	0,038	3.100	A1
R403B	R290/R22/R218 (5,0/56,0/39,0)	0,028	4.500	A1
R405A	R22/R152a/R142b/RC318 (45,0/7,0/5,5/42,5)	0,026	5.300	A1
R406A	R22/R600a/R142b (55,0/4,0/41,0)	0,056	1.900	A2
R408A	R125/R143a/R22 (7,0/46,0/47,0)	0,024	3.200	A1
R409A	R22/R124/R142b (60,0/25,0/15,0)	0,046	1.600	A1
R409B	R22/R124/R142b (65,0/25,0/10,0)	0,045	1.600	A1
R411A	R1270/R22/R152a (1,5/87,5/11,0)	0,044	1.600	A2
R411B	R1270/R22/R152a (3,0/94,0/3,0)	0,047	1.700	A2
R412A	R22/R218/R142b (70,0/5,0/25,0)	0,053	2.300	A2
R414A	R22/R124/R600a/R142b (51,0/28,5/4,0/16,5)	0,043	1.500	A1
R414B	R22/R124/R600a/R142b (50,0/39,0/1,5/9,5)	0,039	1.400	A1
R415A	R22/R152a (82,0/18,0)	0,041	1.500	A2
R415B	R22/R152a (25,0/75,0)	0,013	550	A2
R416A	R134a/R124/R600 (59,0/39,5/1,5)	0,008	1.100	A1
R418A	R290/R22/R152a (1,5/96,0/2,5)	0,048	1.700	A2

Fuente: MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Manual de buenas prácticas en refrigeración. [En línea]. [2014]. Disponible en: <http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialUrbana/Manual-Buenas-Practicas-Refrigeraci%C3%B3n.pdf>, p. 23

Colombia, dentro del Protocolo de Montreal, está clasificado como un país artículo 5, el cual posee un cronograma de eliminación más amplio que los países desarrollados. Todas las sustancias agotadoras de la capa de ozono están clasificadas en anexos y grupos, y cada uno de ellos tiene un cronograma de eliminación diferente. A continuación, se presentan los plazos de eliminación para cada uno de estos grupos de sustancias.

• **Anexo A, Grupo I (Clorofluorocarbonos - CFC)**

Línea base: promedio 1995-1997.

Congelamiento: 1 de enero de 1999.

Reducción 50 % de la línea base: 1 de enero de 2005.

Reducción 85 %: 1 de enero de 2007.

Reducción 100 %: 1 de enero de 2010.

- **Anexo A, Grupo II (Halones)**

Línea base: promedio 1995-1997.

Congelamiento: 1 de enero de 2002.

Reducción 50 %: 1 de enero de 2005.

Reducción 100 %: 1 de enero de 2010.

- **Anexo B, Grupo I (Otros CFC)**

Reducción 20 %: 1 de enero de 2003.

Reducción 85 %: 1 de enero de 2007.

Reducción 100 %: 1 de enero de 2010.

- **Anexo B, Grupo II (Tetracloruro de carbono)**

Línea base: promedio 1998-2000.

Reducción 85 %: 1 de enero de 2005.

Reducción 100 %: 1 de enero de 2010.

- **Anexo B, Grupo II (Metil-cloroformo)**

Línea base: promedio 1998-2000.

Congelamiento: 1 de enero de 2003.

Reducción 30 %: 1 de enero de 2005.

Reducción 70 %: 1 de enero de 2010.

Reducción 100 %: 1 de enero de 2015.

- **Anexo C, Grupo I (Hidroclorofluorocarbonos - HCFC)**

Línea base: promedio consumo 2009 – 2010.

Congelamiento: 1 de enero de 2013.

Reducción 10 %: 1 de enero de 2015.

Reducción 35 %: 1 de enero de 2020.

Reducción 67.5 %: 1 de enero de 2025.

Reducción del 97.5: 1 de enero de 2030.

Reducción 100 %: 1 de enero de 2040.

- **Anexo C, Grupo II (Hidrobromofluorocarbono - HBFC)**

Eliminados en 1996.

- **Anexo C, Grupo III (Bromoclorometano)**

Eliminado en 2002.

- **Anexo E, Grupo I (Bromuro de metilo)**

Línea base: promedio 1995-1998.

Congelamiento: 1 de enero de 2002.

Reducción 20 %: 1 de enero de 2005.

Reducción 100 %: 1 de enero de 2015.⁴³

⁴³ MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Cronograma de eliminación. [En línea]. [2020]. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article?id=195>.

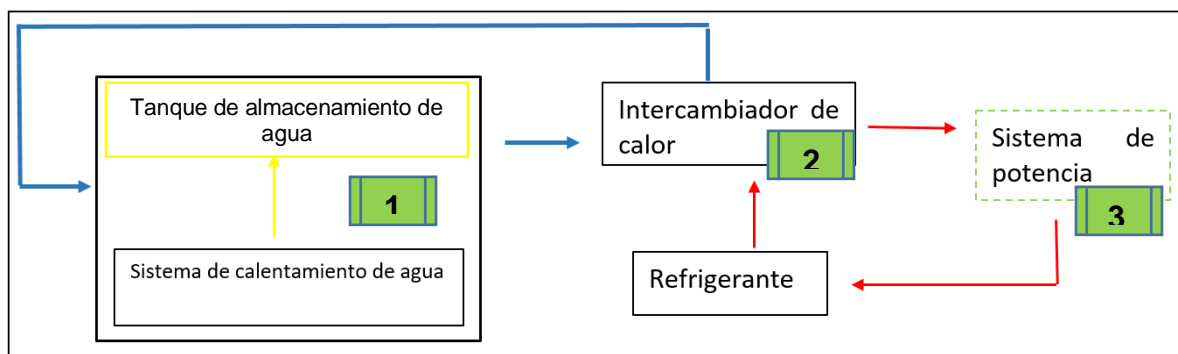
2. DISEÑO CONCEPTUAL Y MODO DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE EVAPORACIÓN DE REFRIGERANTE, EVALUANDO LAS ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN

En el presente capítulo se expone, de manera secuencial, el modo de funcionamiento de los sistemas de evaporación de refrigerante que actualmente se encuentran en el mercado, con sus respectivos requerimientos de diseño. Al integrarlos, estos permitieron realizar un diseño conceptual considerando las necesidades expresadas; razón por la cual se diseñó un diagrama de caja negra con el propósito de ofrecer soluciones a los requerimientos y, de esta manera, describir el modo funcional del sistema en un diagrama para detallar su funcionamiento.

Asimismo, se llevó a cabo la evaluación por medio de una matriz de priorización, obteniendo resultados técnicos apropiados. Por otro lado, mediante flujos de energía se establecieron los sistemas y la descripción de sus respectivos componentes para generar bocetos y realizar alternativas de diseño. De esta forma se pudo evaluar y seleccionar la mejor alternativa a seguir, integrando de manera adecuada los sistemas, realizando un resumen de cada uno de ellos y sus componentes.

2.1 DIAGRAMA DE PROCESO

Diagrama 1. Diagrama de proceso



Fuente: elaboración propia

En el diagrama de proceso anteriormente expuesto, se pretende explicar el proceso general que cumplirá el sistema de evaporación de refrigerante a diseñar. De acuerdo con esto, el proceso inicia con el sistema de calentamiento en donde dispondremos de un tanque de almacenamiento de agua, el cual, a través de un sistema de calentamiento, se elevará la temperatura del agua hasta una temperatura que será determinada posteriormente en sus respectivos cálculos.

Luego de esto, en el sistema de evaporación, tendremos un intercambiador de calor en donde se dará lugar al intercambio de calor entre dos sustancias: agua y refrigerante. Aquí, el agua cederá su calor al refrigerante, haciendo que este pase a su estado gaseoso.

Finalmente, luego de la transferencia de calor, el agua es redirigida nuevamente hacia el tanque de almacenamiento, mientras que el refrigerante, será dirigido al sistema de potencia a alimentar, que, para este caso, será una turbina de generación eléctrica.

Cabe resaltar que el sistema de potencia mencionado anteriormente, no se incluye dentro del proyecto.

2.2 PARÁMETROS BÁSICOS DE DISEÑO

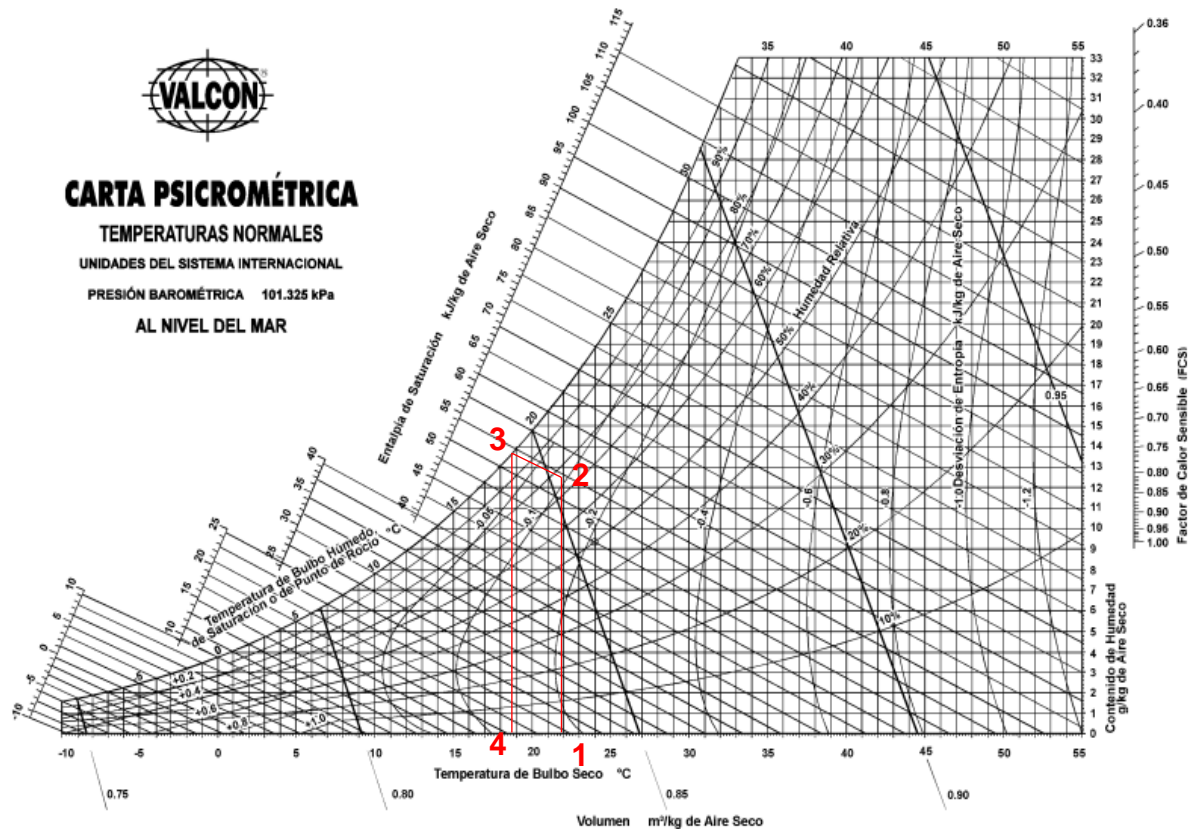
En cuanto a los parámetros básicos de diseño, en el sistema de evaporación de refrigerante se tuvo en cuenta principalmente, que la necesidad de este proyecto consiste en producir suficiente vapor de refrigerante y obtener un flujo másico de vapor adecuado para impulsar una turbina de generación eléctrica. Hoy por hoy, en las industrias se emplean evaporadores en los sistemas de refrigeración, aún sin que se aproveche en su totalidad la energía que entregan estos sistemas.

En ese sentido, se estableció que el diseño del sistema de evaporación de refrigerante debía de ser de tal manera que su operación, funcionamiento y mantenimiento fueran óptimos. Asimismo, se buscó que el operario encargado de su funcionamiento tuviera la mínima interacción con el sistema, para así evitar daños por malos procedimientos en el uso y mantenimiento del sistema de evaporación de refrigerante. Es por ello por lo que se sugiere un mantenimiento preventivo del sistema y sus equipos para prolongar su vida útil.

A su vez, para obtener algunos parámetros básicos de diseño iniciales, se tuvieron en cuenta algunos datos como la ubicación de proyecto, esto es, el departamento de Arauca-Colombia, el cual posee una altura sobre el nivel del mar de 125 msnm, la humedad relativa promedio es del 78 % y la temperatura mínima promedio de bulbo seco es de 22 °C. Con estos datos, y considerando el diagrama psicrométrico, fue posible adquirir, de manera aproximada, la temperatura ambiente del agua en este lugar.

De esta manera con estos datos se procede a realizar el análisis de la temperatura del agua, para esto se ubica el valor de la temperatura mínima promedio de bulbo seco (punto 1) ubicado en el diagrama, una vez ubicado este punto se traza una línea hasta alcanzar el valor de la humedad relativa promedio (punto 2), una vez obtenido este punto se traza una línea paralela a la línea de saturación, de esta manera alcanzando la línea del 100% de la humedad relativa se obtiene la ubicación del punto 3, con estos datos se traza una línea vertical hasta llegar de nuevo a la línea de la temperatura del bulbo seco (punto 4).

Figura 16. Carta psicrométrica



Fuente: elaboración propia, con base en DÍAZ, Alba. Psicometría [en línea]. 2009. Disponible en <https://avdiaz.files.wordpress.com/2009/01/i-unidad3.pdf>

Como se puede observar en la carta psicrométrica, por medio de los datos ofrecidos se pudo determinar la temperatura ambiente del agua en el sitio de ubicación del proyecto, la cual es de 18,8 °C aproximadamente.

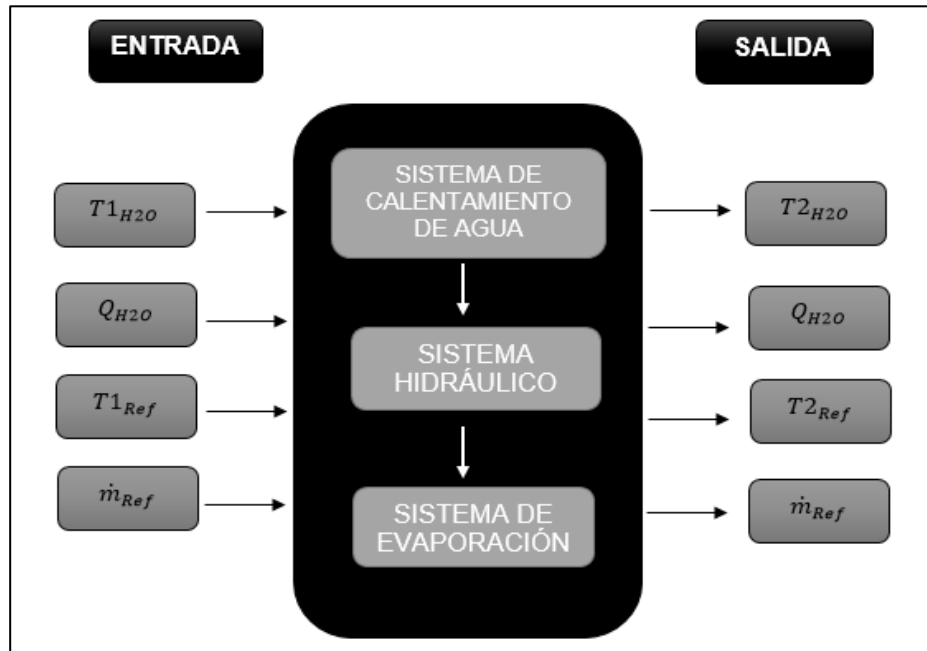
Dentro de los otros parámetros básicos de diseño en este sistema de evaporación de refrigerante a presión y temperatura controlada se encuentra la presión de salida de la turbina, 101,325 kPa y temperatura de salida de la turbina, -20°C, y el flujo másico del vapor de refrigerante, el cual es 35 lb/ min. Estos datos de entrada y salida de la turbina, son suministrados y solicitados por los diseñadores de la turbina. Teniendo en cuenta la ley de conservación de la materia, se asumió que el flujo másico de vapor de refrigerante a la entrada debe ser igual al de la salida.

2.3 DISEÑO CONCEPTUAL

Por medio de un diagrama de caja negra (ver Diagrama 2), a continuación, se explica el diseño conceptual y los requerimientos de diseño en la primera fase.

Este diagrama evidencia el modo de funcionamiento del sistema de evaporación de refrigerante.

Diagrama 2. Diagrama de caja negra



Fuente: elaboración propia

A partir de este diagrama de caja negra, se da a entender los elementos de entrada y salida con los que será diseñado el sistema.

Según esto, al sistema de evaporación de refrigerante ingresará un flujo de refrigerante y un caudal de agua a una cierta temperatura. Dentro del sistema de evaporación, ambos fluidos pasarán por medio de un sistema de calentamiento, un sistema hidráulico y un sistema de evaporación. Luego de esto, a la salida del sistema de evaporación, tendremos un caudal de agua y un flujo de refrigerante a diferentes condiciones que las iniciales.

Por otra parte, en el Cuadro 1 se plantearon las especificaciones de diseño del sistema de evaporación de refrigerante a presión y temperatura controlada, contemplando la importancia de conceptos como, por ejemplo: funciones, operaciones necesarias y mantenimiento.

Cuadro 1. Especificaciones de diseño

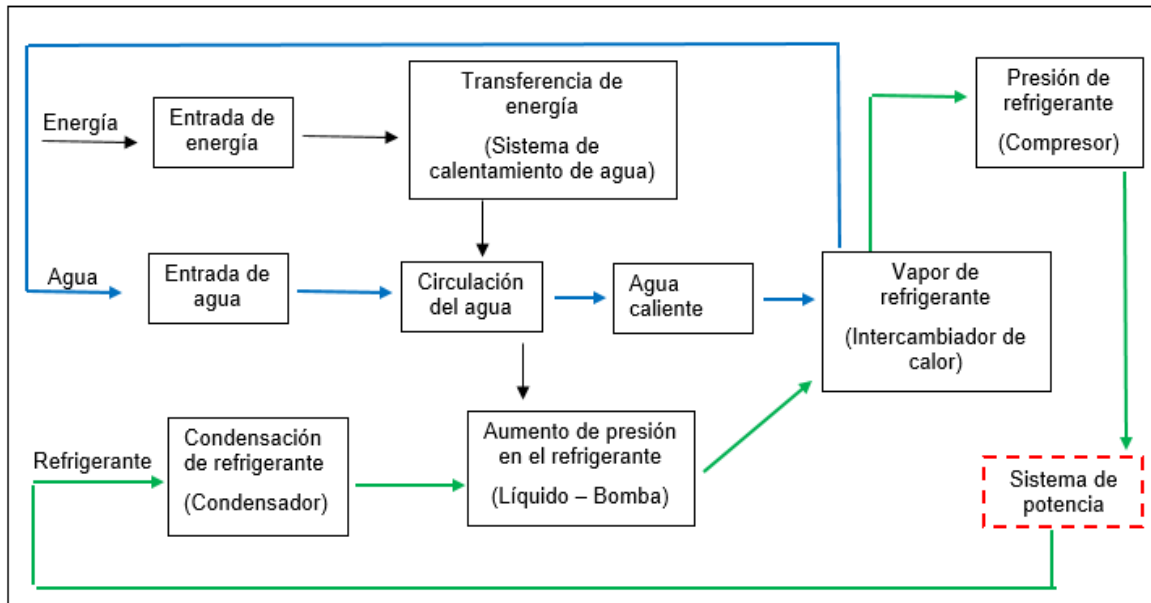
Especificaciones	
Concepto	Descripción
Funcionamiento	El sistema de evaporación no debe ser iniciado sin antes tener el delta de temperatura requerido para su buen funcionamiento.
Operaciones necesarias	El sistema de evaporación debe ser iniciado por un operario.
	El tiempo en que dure el sistema de evaporación en servicio dependerá de las necesidades establecidas en la planta en donde se encuentra ubicado el sistema.
Mantenimiento	El sistema debe ser diseñado con fácil acceso a sus componentes para facilitar el debido mantenimiento al que debe ser sometido.
	Se debe realizar un mantenimiento preventivo y correctivo según las necesidades y equipos del sistema de evaporación de refrigerante.

Fuente: elaboración propia

2.4 ANÁLISIS Y MODO DE FUNCIONAMIENTO

A partir del diagrama de caja negra expuesto anteriormente, se evidenció el modo funcional del sistema de evaporación de refrigerante y la secuencia de los sistemas principales del sistema de evaporación de refrigerante.

Diagrama 3. Modo funcional del sistema de evaporación de refrigerante



Fuente: elaboración propia

Para explicar el diagrama de modo funcional del sistema de evaporación de refrigerante, iniciaremos con los tres componentes a la entrada del sistema: energía, agua y refrigerante. La energía alimenta el sistema de calentamiento, en donde se elevará la temperatura del agua para que esta pueda continuar su camino hacia el sistema de evaporación. Mientras tanto, el refrigerante, que se encuentra en el condensador, es impulsado por una bomba hasta llegar al intercambiador de calor, junto al agua.

Luego de ambos fluidos haber intercambiado sus temperaturas, por un lado, el agua retornará nuevamente hacia el tanque de almacenamiento, mientras que el refrigerante, pasará por un compresor en donde se elevará su presión para poder llegar al sistema de potencia. Luego de haber cumplido su función en el sistema de potencia, el refrigerante regresará nuevamente al condensador de nuestro sistema.

2.4.1 Diseño preliminar

Diseño de un sistema de evaporación de refrigerante a presión y temperatura controlada para la alimentación de turbinas de generación eléctrica.

2.5 CONDICIONES DE DISEÑO

Para poder desarrollar el diseño del sistema de evaporación, se deben tener en cuenta los parámetros básicos de diseño, para así realizar los cálculos adecuados y llegar a las mejores condiciones de operación del sistema de evaporación.

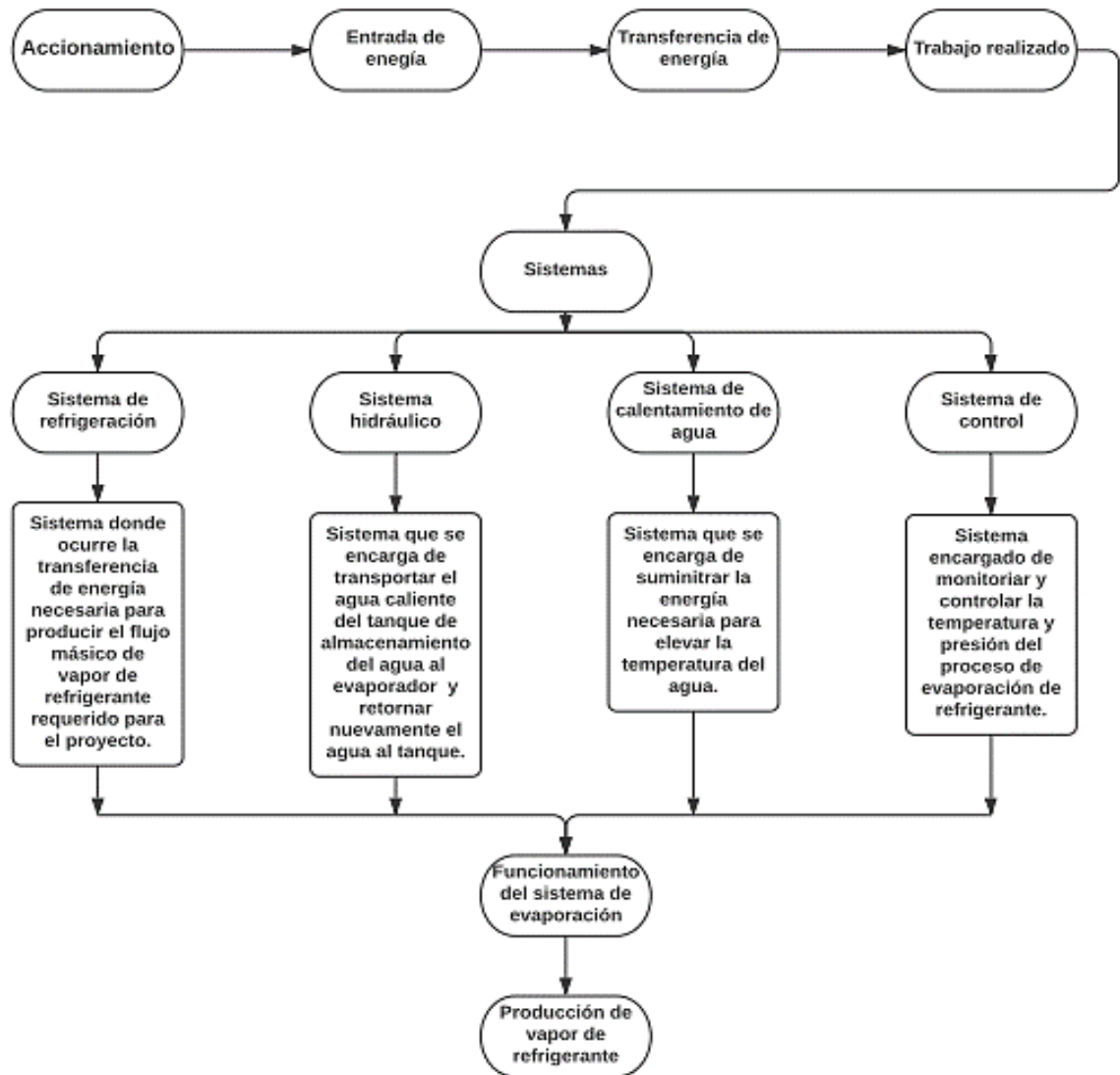
2.5.1 Cantidad de vapor producido. En los sistemas actuales, el flujo másico a la salida de un evaporador empleado en sistemas de refrigeración es relativamente bajo en comparación con los sistemas de bomba de calor que entregan un flujo másico, presión y temperatura un poco más alto. Para el sistema de evaporación a diseñar se requiere un flujo másico de vapor de refrigerante de 35 lb/min.

Este valor del flujo másico de vapor de refrigerante se determina a partir de los requerimientos establecidos por el consumidor final, es decir, una turbina de generación eléctrica que para su correcto funcionamiento necesita de 35 lb/min de vapor de refrigerante.

2.6 CAPACIDAD DE TRABAJO

2.6.1 Estructura. Teniendo en cuenta las condiciones planteadas, se concluyó que el sistema debe tener unos requerimientos específicos en el diseño de su estructura funcional, conformado por sistemas como: sistema de refrigeración, sistema hidráulico, sistema térmico y sistema de control.

Diagrama 4. Diagrama de flujo de energía



Fuente: elaboración propia

Este flujo de energía permitió ordenar los sistemas en función de la transferencia de energía y el trabajo obtenido dentro del sistema de evaporación a diseñar.

2.7 MÉTODO MATRIZ DE PRIORIZACIÓN

La matriz de priorización se conoce como una herramienta que facilita la elección de opciones, basándose en la ponderación y aplicación de criterios. Por medio de esta es posible trazar alternativas y criterios que deben ser considerados a la hora de tomar una decisión, clarificar problemas, oportunidades de mejora y proyectos, estableciendo prioridades.

Para el desarrollo de esta matriz se establecen cuatro pasos fundamentales:

Paso 1: definir el objetivo final de la matriz.

Paso 2: definir las opciones.

Paso 3: establecer los criterios.

Paso 4: pesos ponderados de los criterios.

Paso 5: enfrentar las opciones para el primer criterio.

Paso 6: enfrentar las opciones para los demás criterios.

En el paso 5 y 6 se determina la importancia relativa de cada criterio, para así establecer la ponderación. Para ello, la matriz a realizar fue en forma de L, en donde los criterios están en la primera fila y columna. La línea diagonal queda inhabilitada al no poderse comparar un criterio contra sí mismo.

La dinámica de la matriz consiste en responder a la pregunta de si cada criterio de la columna es más o menos importante que el criterio de la fila. Posteriormente, se procede a calificar en la casilla respectiva teniendo en cuenta lo siguiente:

- 10: el criterio de columna es mucho más importante que el criterio de fila.
- 5: el criterio de columna es más importante que el criterio de fila.
- 1: ambos criterios son igual de importantes.
- 0.2: el criterio de columna es menos importante que el criterio de fila.
- 0.1: el criterio de columna es mucho menos importante que el criterio de fila.

En ese orden de ideas, para este proyecto se plantearon tres matrices de priorización. La primera corresponde a la evaluación de sistemas de refrigerantes, la segunda a la evaluación de los intercambiadores de calor y, por último, una matriz para la evaluación del mejor sistema de calentamiento de agua.

2.7.1 Matriz de priorización para la evaluación del mejor sistema de evaporación de refrigerante. Para el desarrollo de esta matriz se aplicaron los pasos anteriormente mencionados de la siguiente manera:

Paso 1: definir el mejor sistema de evaporación de refrigerante.

Paso 2: para este proyecto las dos opciones que se evaluaron fueron las siguientes:

- Sistema de refrigeración.
- Sistema de bomba de calor.

Paso 3: los criterios a evaluar fueron:

- Flujo másico.
- Eficiencia.

- Adaptación al medio en el que será desarrollado el proyecto.
- Precio del sistema.
- Tamaño.
- Fabricación costo precio tamaño eficiencia energética mantenimiento.

Paso 4: el peso ponderado para cada criterio fue:

- Flujo másico: 0,54 %.
- Eficiencia: 0,20 %.
- Adaptación al medio en el que será desarrollado el proyecto: 0.03 %.
- Precio del sistema: 0,20 %.
- Tamaño: 0,03 %.

Considerando lo anterior, se desarrolló la matriz que se expone en las siguientes tablas.

Tabla 7. Matriz de priorización para la selección de sistema de evaporación de refrigerante

Evaluación mejor sistema de evaporación de refrigerante							
Ponderación de los criterios							
	Flujo másico	Eficiencia	Adaptación	Precio	Tamaño	Total	Peso ponderado definido
Flujo másico		5	10	5	10	30,00	0,54
Eficiencia	0,2		5	1	5	11,20	0,20
Adaptación	0,1	0,2		0,2	1	1,50	0,03
Precio	0,2	1	5		5	11,20	0,20
Tamaño	0,1	0,2	1	0,2		1,50	0,03
Total						55,4	1,00

Fuente: elaboración propia

A continuación, se califican las opciones por cada criterio:

Tabla 8. Calificación de opciones por cada criterio

Calificación de flujo másico por criterio				
Flujo másico	Sistema refrigeración	Sistema Bomba de calor	Total	Peso relativo
Sistema refrigeración		0,1	0,1	0,01
Sistema Bomba de calor	10		10	0,99
Total			10,1	1

Calificación de eficiencia por criterio				
Eficiencia	Sistema refrigeración	Sistema Bomba de calor	Total	Peso relativo
Sistema refrigeración		0,2	0,2	0,04
Sistema Bomba de calor	5		5	0,96
Total			5,2	1

Calificación de adaptación por criterio				
Adaptación	Sistema refrigeración	Sistema Bomba de calor	Total	Peso relativo
Sistema refrigeración		0,2	0,2	0,04
Sistema Bomba de calor	5		5	0,96
Total			5,2	1

Calificación de precio por criterio				
Precio	Sistema refrigeración	Sistema Bomba de calor	Total	Peso relativo
Sistema refrigeración		1	1	0,5
Sistema Bomba de calor	1		1	0,5
Total			2	1

Calificación de tamaño por criterio				
Tamaño	Sistema refrigeración	Sistema Bomba de calor	Total	Peso relativo
Sistema refrigeración		5	5	0,96
Sistema Bomba de calor	0,2		0,2	0,04
Total			5,2	1

Fuente: elaboración propia

Por otro lado, en las siguientes tablas se expone el consolidado de la puntuación de las diferentes opciones y, posteriormente, la calificación total por opción y por criterio.

Tabla 9. Consolidado de calificación de opciones

Consolidado de calificación de opciones					
	Flujo másico	Eficiencia	Adaptación	Precio	Tamaño
Sistema refrigeración	0,01	0,04	0,04	0,50	0,96
Sistema Bomba de calor	0,99	0,96	0,96	0,50	0,04

Fuente: elaboración propia

Tabla 10. Calificación total por opción y criterio ponderado

Calificación total por opción por criterio ponderado						
	Flujo másico	Eficiencia	Adaptación	Precio	Tamaño	Total
Sistema refrigeración	0,005	0,008	0,001	0,101	0,026	0,14
Sistema Bomba de calor	0,536	0,194	0,026	0,101	0,001	0,86

Fuente: elaboración propia

Teniendo en cuenta los resultados de la matriz de priorización, en donde se evaluaron los dos sistemas de evaporación de refrigerante, se logró evidenciar que los criterios del sistema de bomba de calor obtuvieron mejor calificación, lo que equivale a su mayor puntuación en la calificación total. Esto quiere decir que el sistema de bomba de calor es el más apto para el desarrollo del proyecto, en tanto que cumple los criterios propuestos de manera satisfactoria. Cabe resaltar que

dichos criterios son los mismos requerimientos propuestos por parte del cliente de este producto.

2.7.2 Matriz de priorización para intercambiadores de calor. Como se mencionó en el capítulo anterior, existe gran variedad de intercambiadores de calor que pueden ser clasificados entre sus aplicaciones, modo de funcionamiento, construcción, entre otros. Para el desarrollo de esta matriz se tuvo en cuenta dicha clasificación y, a partir de ello, se seleccionaron tres intercambiadores de calor viables, considerando el criterio de los autores del proyecto. En ese sentido, se procedió con el desarrollo de la segunda matriz de priorización con los siguientes pasos:

Paso 1: definir el mejor intercambiador de calor.

Paso 2: Para este proyecto las tres opciones que se evaluaron fueron las siguientes:

- Tubo y coraza.
- De placas.
- Espiral.

Paso 3: los criterios a evaluar fueron:

- Eficiencia energética.
- Fabricación.
- Mantenimiento.
- Precio.
- Área de transferencia de calor.

Paso 4: el peso ponderado para cada criterio fue:

- Eficiencia energética: 0,43 %.
- Fabricación: 0,10 %.
- Mantenimiento: 0,11 %.
- Precio: 0,01 %.
- Área de transferencia de calor: 0,35 %.

Así pues, se desarrolló la matriz que se expone en las siguientes tablas.

Tabla 11. Matriz de priorización para la selección intercambiador de calor

SELECCIÓN INTERCAMBIADOR DE CALOR							
Ponderación de los criterios							
	Eficiencia energética	Fabricación	Mantenimiento	Precio	Área de transferencia de calor	Total	Peso ponderado definido
Eficiencia energética		10	5	10	1	26,00	0,43
Fabricación	0,1		1	5	0,1	6,20	0,10
Mantenimiento	0,2	1		5	0,2	6,40	0,11
Precio	0,1	0,2	0,2		0,1	0,60	0,01
Área de transferencia de calor	1	5	5	10		21,00	0,35
Total						60,2	1,00

Fuente: elaboración propia

A continuación, se califican las opciones por cada criterio:

Tabla 12. Calificación de opciones por cada criterio

Calificación de opciones por cada criterio					
Eficiencia energética	Tubo y coraza	De placas	Espiral	Total	Peso relativo
Tubo y coraza		5	10	15	0,70
De placas	0,2		5	5,2	0,24
Espiral	1	0,2		1,2	0,06
Total				21,4	1,00

Fabricación	Tubo y coraza	De placas	Espiral	Total	Peso relativo
Tubo y coraza		0,2	0,2	0,4	0,03
De placas	5		1	6	0,48
Espiral	5	1		6	0,48
Total				12,4	1,00

Mantenimiento	Tubo y coraza	De placas	Espiral	Total	Peso relativo
Tubo y coraza		0,2	0,2	0,4	0,03
De placas	5		0,2	5,2	0,33
Espiral	5	5		10	0,64
Total				15,6	1,00

Precio	Tubo y coraza	De placas	Espiral	Total	Peso relativo
Tubo y coraza		0,2	0,1	0,3	0,01
De placas	5		0,2	5,2	0,25
Espiral	10	5		15	0,73
Total				20,5	1,00

Área de transferencia de calor	Tubo y coraza	De placas	Espiral	Total	Peso relativo
Tubo y coraza		0,1	5	5,1	0,20
De placas	10		10	20	0,79
Espiral	0,2	0,1		0,3	0,01
Total				25,4	1,00

Fuente: elaboración propia

Por otro lado, se realizó el consolidado de la puntuación de las diferentes opciones y la calificación total por opción y criterio.

Tabla 13. Consolidado de calificación de opciones

Consolidado de calificación de opciones					
	Eficiencia energética	Fabricación	Mantenimiento	Precio	Área de transferencia de calor
Tubo y coraza	0,70	0,03	0,03	0,01	0,20
De placas	0,24	0,48	0,33	0,25	0,79
Espiral	0,06	0,48	0,64	0,73	0,01

Fuente: elaboración propia

Tabla 14. Calificación total por opción y criterio ponderado

Calificación total por opción por criterio ponderado						
	Eficiencia energética	Fabricación	Mantenimiento	Precio	Área de transferencia de calor	Total
Tubo y coraza	0,303	0,003	0,003	0,000	0,070	0,38
De placas	0,105	0,050	0,035	0,003	0,275	0,47
Espiral	0,024	0,050	0,068	0,007	0,004	0,15

Fuente: elaboración propia

Como es posible observar en la matriz, el mejor evaluado fue el intercambiador de tipo placas, pues tuvo el mejor reconocimiento frente a los criterios establecidos.

2.7.3 Matriz de priorización para método de calentamiento de agua. Se realizó una matriz de priorización para evaluar el mejor método de calentamiento de agua que se le pueda adicionar al proyecto para mejorar su eficiencia.

Así las cosas, se contemplaron los siguientes pasos:

Paso 1: definir el método de calentamiento de agua.

Paso 2: para este proyecto se evaluaron dos opciones:

- Por resistencia eléctrica.
- Por energía solar.

Paso 3: los criterios a evaluar fueron:

- Cantidad de agua que calienta.
- Eficiencia.
- Área que ocupa.
- Instalación.
- Precio.

Paso 4: el peso ponderado para cada criterio fue el siguiente:

- Cantidad de agua que calienta: 0,50 %.
- Eficiencia: 0,34 %.
- Área que ocupa: 0,02 %.
- Instalación: 0,04 %.
- Precio: 0,10 %.

En consecuencia, se desarrolló la matriz que se expone en las siguientes tablas.

Tabla 15. Matriz de priorización para la selección del método de calentamiento de agua

Elección Calentamiento de agua							
Ponderación de los criterios							
	Cantidad de agua que calienta	Eficiencia	Área que ocupa	Instalación	Precio	Total	Peso ponderado definido
Cantidad de agua que calienta		1	10	10	10	31,00	0,50
Eficiencia	1		5	5	10	21,00	0,34
Área que ocupa	0,1	0,2		1	0,2	1,50	0,02
Instalación	0,1	0,2	1		1	2,30	0,04
Precio	0,1	0,1	5	1		6,20	0,10
Total						62	1,00

Fuente: elaboración propia

A continuación, se califican las opciones por cada criterio:

Tabla 16. Calificación de opciones por cada criterio

Calificación de opciones por cada criterio				
Cantidad de agua que calienta	Por resistencia	Energía solar	Total	Peso relativo
Por resistencia		5	5	0,96
Energía solar	0,2		0,2	0,04
Total			5,2	1
Eficiencia	Por resistencia	Energía solar	Total	Peso relativo
Por resistencia		5	5	0,96
Energía solar	0,2		0,2	0,04
Total			5,2	1
Área que ocupa	Por resistencia	Energía solar	Total	Peso relativo
Por resistencia		1	1	0,5
Energía solar	1		1	0,5
Total			2	1
Instalación	Por resistencia	Energía solar	Total	Peso relativo
Por resistencia		0,1	0,1	0,01
Energía solar	10		10	0,99
Total			10,1	1
Precio	Por resistencia	Energía solar	Total	Peso relativo
Por resistencia		1	1	0,5
Energía solar	1		1	0,5
Total			2	1

Fuente: elaboración propia

Sumado a lo anterior, se realizó el consolidado de la puntuación de las diferentes opciones y la calificación total por opción y criterio.

Tabla 17. Consolidado de calificación por opciones y por criterio ponderado

Consolidado de calificación de opciones					
	Cantidad de agua que calienta	Eficiencia	Área que ocupa	Instalación	Precio
Por resistencia	0,96	0,96	0,50	0,01	0,50
Energía solar	0,04	0,04	0,50	0,99	0,50

Tabla 18. Calificación total por opción y criterio ponderado

Calificación total por opción por criterio ponderado						
	Cantidad de agua que calienta	Eficiencia	Área que ocupa	Instalación	Precio	Total
Por resistencia	0,481	0,326	0,012	0,000	0,050	0,87
Energía solar	0,019	0,013	0,012	0,037	0,050	0,13
	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00

Fuente: elaboración propia

De esta manera, se infiere que el mejor método para el calentamiento de agua es el de resistencias eléctricas.

Finalmente, concluimos este capítulo resumiendo dentro de una tabla, los tres componentes seleccionados con los que será diseñado el sistema de evaporación de refrigerante.

Tabla 19. Componentes seleccionados para el diseño del sistema de evaporación.

Sistema Bomba de Calor	Intercambiador de calor tipo Placas	Resistencia eléctrica
 <p>Bomba de Calor Diagrama de Flujo</p>		

El sistema de evaporación de refrigerante será diseñado bajo el modelo de un sistema bomba de calor, también trabajará con un intercambiador de calor tipo placas para la transferencia de calor, una resistencia eléctrica para el sistema de calentamiento y empleando refrigerante R-134a ya que este tipo de refrigerante actualmente es el más comercial, económico, no posee potencial de agotamiento de ozono (PAO), y un potencial de calentamiento global (GWP) bajo con respecto a los demás refrigerantes.

3. DISEÑO DETALLADO DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA DE EVAPORACIÓN DE REFRIGERANTE SELECCIONADO

En el presente capítulo se ofrece una solución concreta al sistema de generación de vapor de refrigerante para la alimentación de una turbina de generación eléctrica con base en las alternativas de solución seleccionadas en el capítulo anterior.

Para ello, se llevó a cabo el balance térmico general de ciclo, para así obtener los datos de entrada y, en consecuencia, el diseño detallado de los respectivos sistemas que conforman el proyecto.

Así, en este capítulo se determinó el diseño detallado de los siguientes sistemas:

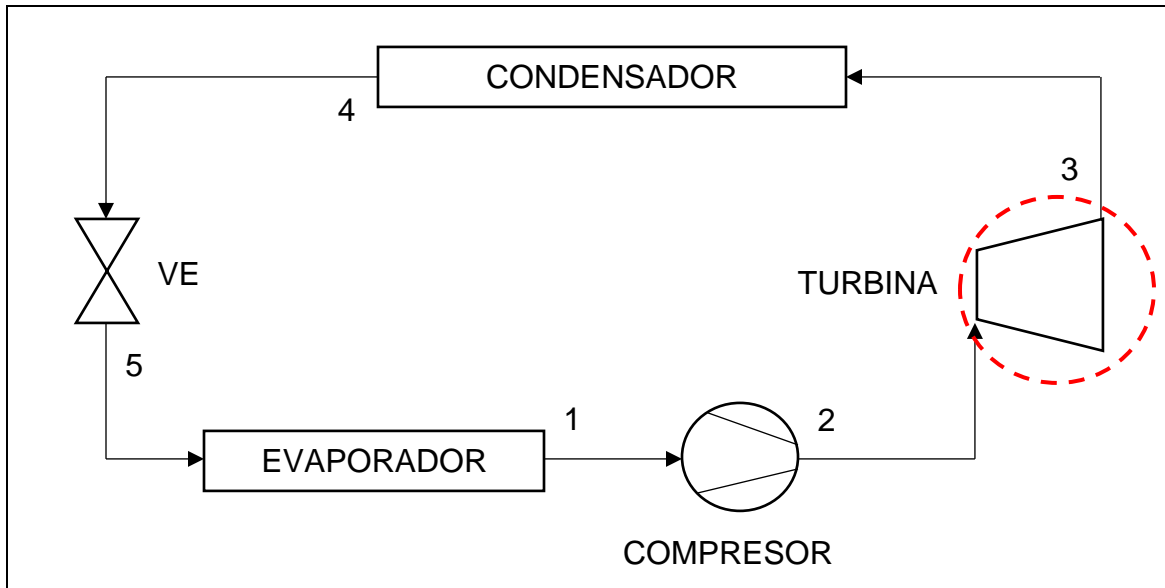
- Sistema refrigeración.
- Sistema hidráulico.
- Sistema de calentamiento de agua.
- Sistema de control.

Finalmente, se procedió a realizar el diseño estructural donde se ubicarán respectivamente los equipos seleccionados que conforman el proyecto. Asimismo, se detalló la información en relación con los materiales empleados en el sistema de evaporación de refrigerante para la alimentación de una turbina de generación eléctrica.

3.1 BALANCE TÉRMICO DE CICLO

Esta es la parte más importante del diseño del sistema, puesto que aporta los datos necesarios para el diseño detallado de los sistemas y la selección adecuada de los equipos que lo componen.

Diagrama 5. Evaporador, compresor, turbina, condensador, VE (Válvula de expansión)



Fuente: elaboración propia.

Cabe resaltar que la turbina “sistema de potencia” expuesto anteriormente (ver diagrama 5), no se incluye dentro del proyecto.

Tabla 20. Datos de entrada

DATOS DE ENTRADA	
<i>Presión de salida de la turbina</i>	0,101325 MPa
<i>Temperatura de salida de la turbina</i>	-20°C
<i>Caída de presión en la valvula de expansion</i>	5 psia
	34,4738 kPa

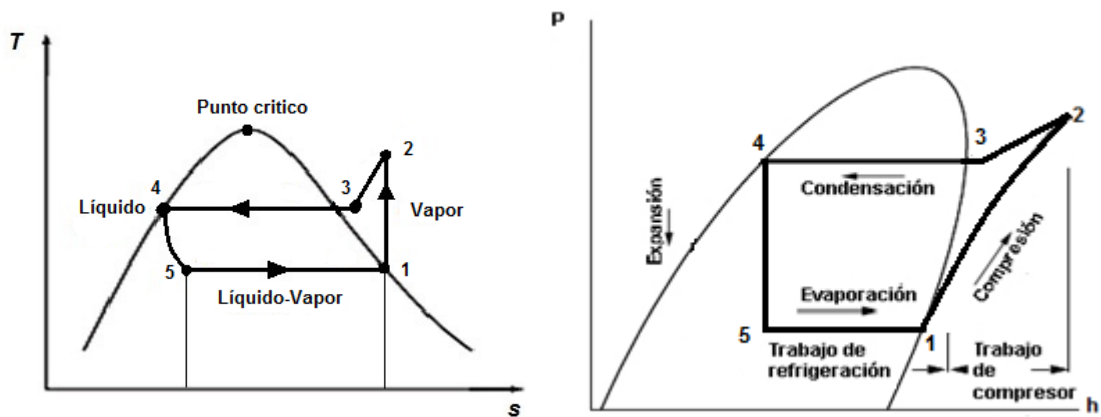
Fuente: elaboración propia.

Estos datos de entrada en el sistema de evaporación de refrigerante a presión y temperatura controlada se encuentra la presión de salida de la turbina, 101,325 kPa y temperatura de salida de la turbina, -20°C, y el flujo másico del vapor de refrigerante, el cual es 35 lb/ min. Estos datos de entrada y salida de la turbina, son suministrados y solicitados por los diseñadores de la turbina, por otra parte, se estableció que la válvula de expansión del sistema debe de tener una caída de presión de 5 psia ya que estos sistemas deben de ser cargados en vacío, como podemos observar, encontramos el vapor de refrigerante a la salida de la turbina

a una presión atmosférica, por ende con esta caída de presión obtenemos una presión de vacío en este punto, ideal para ser cargado.

Al no haber ningún requerimiento especial con respecto a los datos de entrada y salida del evaporador, compresor y condensador, se decidió, con plena libertad, ajustar los datos a criterio del diseñador siguiendo el diagrama T-S y P-h del ciclo.

Diagrama 6. Diagramas T-s y P-h.



Fuente: elaboración propia.

Conociendo los datos en el Estado 3: "salida de la turbina" (ver Tabla 21), y tomando como referencia las tablas termodinámicas, se determinó el de entalpía y entropía en este punto para el balance.

Tabla 21. Estado 3: "salida de la turbina"

ESTADO 3: "SALIDA DE LA TURBINA"	
P_3	0,101325 MPa
T_3	-20 °C
h_3	239,50 $\frac{kJ}{kg}$
S_3	0,9721 $\frac{kJ}{kg K}$

Fuente: elaboración propia

Por otro lado, considerando los datos del Estado 3, se procedió a encontrar los datos para los demás estados, siguiendo los parámetros teóricos para este tipo de ciclo.

Tabla 22. Estado 4: "salida del condensador"

ESTADO 4: "SALIDA DEL CONDENSADOR"	
T_4	$-20\text{ }^{\circ}\text{C}$
P_4	$132,82\text{ kPa}$
$h_4 = h_f$	$25,49\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
$S_4 = S_f$	$0,10463\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$

Fuente: elaboración propia

Tabla 23. Estado 5: "salida de la válvula de expansión"

ESTADO 5: "SALIDA DE LA VÁLVULA DE EXPANSIÓN"	
<i>Caida de presión</i>	5 psia
P_5	$98,3462\text{ kPa}$
T_5	$-26,7470\text{ }^{\circ}\text{C}$
$h_4 = h_5$	$25,49\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

Fuente: elaboración propia

Con los datos obtenidos en el estado 5, se procede a calcular el valor de la calidad que se encuentra en este punto, como se puede observar en los diagramas T-s y P- h (ver diagrama 6), este punto se encuentra en una mezcla liquido – vapor.

Ecuación 1. Ecuación de calidad de la mezcla

$$h_5 = h_f + X (h_{fg})$$

Fuente: elaboración propia con base en ÇENGEL, Yunus y BOLES, Michael. Termodinámica. Séptima edición. México: Mc-Graw Hill, 2011.

Donde a una presión de 98, 3462 kPa e interpolando se obtienes los siguientes valores por medio de las tablas termodinámicas para refrigerante R-134a.

$$h_f = 16,7987\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_{fg} = 217,4064\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Reemplazando en la ecuación anterior se puede obtener el valor de la calidad de la mezcla en este punto.

$$X = \frac{25,49 \frac{kJ}{kg} - 16,7987 \frac{kJ}{kg}}{217,4064 \frac{kJ}{kg}}$$

$$X = 0,03997$$

$$X = 3,9977 \%$$

Con este resultado podemos deducir que en este punto solo se evapora el 3,9977% del refrigerante y así procedemos a seguir obteniendo los datos de los siguientes estados.

Tabla 24. Estado 1: "salida del evaporador"

ESTADO 1 "SALIDA DEL EVAPORADOR"	
$P_1 = P_5$	98,3462 kPa
$T_1 = T_5$	-26,7470 °C
$h_1 = h_g$	234,2051 $\frac{kJ}{kg}$
$S_1 = S_g$	0,9522 $\frac{kJ}{kg K}$

Fuente: elaboración propia

Tabla 25. Estado 2: "salida del compresor"

ESTADO 2: "SALIDA DEL COMPRESOR"	
P_2	0,60 MPa
T_2	30,7255 °C
h_2	271,5188 $\frac{kJ}{kg}$
$S_2 = S_1$	0,9522 $\frac{kJ}{kg K}$

Fuente: elaboración propia

Estos datos de los estados a la salida de cada componente se obtuvieron de las tablas de propiedades termodinámicas para R-134a del libro de termodinámica de Cengel séptima edición.

3.2 DISEÑO DETALLADO DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

3.2.1 Selección del evaporador. Para la selección adecuada del evaporador, se debe tener en cuenta que se requiere generar un flujo másico de 35 lb/min de vapor de refrigerante 134a, así como los datos obtenidos anteriormente en el balance térmico.

Ecuación 2. Ecuación de calor en el evaporador

$$\dot{Q}_E = \dot{m}_R * h_g$$

Fuente: elaboración propia con base en ÇENGEL, Yunus y BOLES, Michael. Termodinámica. Séptima edición. México: Mc-Graw Hill, 2011.

Donde

\dot{Q}_E = Calor de entrada en el evaporador.

$$\dot{m}_R: \text{Flujo másico del refrigerante} = 35 \frac{\text{lb}}{\text{min}} = 0,264596 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$h_g: \text{Entalpía del evaporador} = 234,2051 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Conociendo los datos, se reemplazan en la ecuación.

$$\dot{Q}_E = 0,264596 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 234,2051 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\dot{Q}_E = 61,9697 \text{ kW}$$

Asimismo, teniendo en cuenta la potencia que requiere el evaporador para producir el flujo másico, se procedió a seleccionar el intercambiador de placas tipo evaporador que se ajustara al proyecto y a los datos obtenidos.

Para tal fin, se empleó la herramienta de selección de la empresa Alfa Laval. Esta sugirió, para este tipo de procesos, emplear un intercambiador de calor de placas soldadas de 62,3 kW, un refrigerante 134a y en su lado secundario agua, que es lo que se requiere en el proyecto.

Figura 17. Datos técnicos del evaporador

Datos Técnicos	
Proceso Evaporador	Max. Pressure Drop (kPa) 50 kPa
Refrigerante R134A	Length (mm) 219 mm
Lado secundario Agua	Width (mm) 191 mm
Capacity (kW) 62,3 kW	Height (mm) 616 mm
Evaporating Temp. (°C) Tevap. +3 °C	Weight (kg) 34,5 kg
Temp. secondary side (°C) 12 → 7 °C	

Fuente: elaboración propia con base en ALFA LAVAL. Programa de cálculo, refrigeración, refrigeración comercial, evaporación. [En línea]. [15 de agosto de 2020]. Disponible en:

<https://productguide.alfalaval.com/products/c013?country=ES&language=es-ES>

3.2.2 Selección del condensador. Por otro lado, se hicieron los cálculos pertinentes para la correcta selección del evaporador para el proyecto como, por ejemplo, calor de rechazo y caudal en CFM.

Ecuación 3. Ecuación de calor en el condensador.

$$\dot{Q}_S = \dot{m}_R * h_f$$

Fuente: elaboración propia con base en ÇENGEL, Yunus y BOLES, Michael. Termodinámica. Séptima edición. México: Mc-Graw Hill, 2011.

Donde

\dot{Q}_S = Calor de salida en el condensador.

$$\dot{m}_R: \text{Flujo másico del refrigerante} = 35 \frac{\text{lb}}{\text{min}} = 0,264596 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$h_f: \text{Entalpía del condensador} = 25,49 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Conociendo los datos, se reemplazan en la ecuación.

$$\dot{Q}_S = 0,264596 \frac{kg}{s} * 25,49 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{Q}_S = 6,7445 kW$$

Se requiere calcular el caudal del condensador en CFM.

Al conocer la temperatura ambiente mínima de 22 °C en el sitio donde se ubicará el proyecto, y al no haber ningún requerimiento especial con respecto a la temperatura de salida del aire del condensador, se decidió, con plena libertad, establecerla a criterio del diseñador, la cual es de 13 °C.

Ecuación 4. Ecuación de Flujo másico del aire.

$$\dot{m}_R * h_f = \dot{m}_{aire} (h_2 - h_1)$$

Fuente: elaboración propia con base en ÇENGEL, Yunus y BOLES, Michael. Termodinámica. Séptima edición. México: McGraw Hill, 2011.

Donde

$$\dot{m}_R: \text{Flujo másico del refrigerante} = 35 \frac{lb}{min} = 0,264596 \frac{kg}{s}$$

$$h_f: \text{Entalpía del condensador} = 25,49 \frac{kJ}{kg}$$

\dot{m}_{aire} : Flujo masico del aire.

$$h_2: \text{Entalpía del aire a } 22 \text{ °C} = 295,32 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_1: \text{Entalpía del aire a } 13 \text{ °C} = 286,294 \frac{kJ}{kg}$$

Así pues, reemplazando en la ecuación, se obtuvo:

$$0,264596 \frac{kg}{s} * 25,49 \frac{kJ}{kg} = \dot{m}_{aire} \left(295,32 \frac{kJ}{kg} - 286,294 \frac{kJ}{kg} \right)$$

$$\dot{m}_{aire} = 0,74723 \frac{kg}{s}$$

Adicionalmente, obteniendo el flujo másico del aire en el condensador, se procedió a calcular el caudal que proporcionó los resultados anteriores.

Ecuación 5. Ecuación del caudal del aire.

$$Q = \frac{\dot{m}_{aire}}{\rho}$$

Fuente: elaboración propia con base en ÇENGEL, Yunus y BOLES, Michael. Termodinámica. Séptima edición. México: McGraw Hill, 2011.

Donde

Q : Caudal del aire.

\dot{m}_{aire} : Flujo masico del aire = $0,74723 \frac{kg}{s}$

ρ = Densidad del aire = $1,202 \frac{kg}{m^3}$.

Reemplazando en la ecuación se obtiene

$$Q = \frac{0,74723 \frac{kg}{s}}{1,202 \frac{kg}{m^3}}$$

$$Q = 0,6216 \frac{m^3}{s}$$

$$Q = 1317,2029 \text{ CFM}$$

Al obtener el calor de rechazo y el caudal del aire, se seleccionó el condensador más apropiado para el proyecto, el cual se encuentra disponible en el catálogo de la empresa Thermo-Coil Ltda. Para seleccionar el condensador, dicha empresa sugiere una guía para la selección en su respectivo catálogo.

Cuadro 2. Guía para seleccionar condensadores

GUÍA PARA SELECCIONAR CONDENSADORES

Los rendimientos indicados en la tabla de características generales, se refieren al calor total disipado en el condensador igual a la suma de la capacidad frigorífica del compresor más el equivalente térmico del trabajo de compresión (Q_t).

FACTORES PARA LA SELECCIÓN DE CONDENSADORES

F_1 : Factor de corrección en función de la diferencia de temperatura DT entre la temperatura de condensación y la del ambiente.

DT (°F)	15	17	19	21	23	25	27	29	31	33	35
F_1	1.79	1.56	1.32	1.22	1.1	1	0.92	0.85	0.79	0.74	0.69

F_2 : Factor de corrección en función de la diferencia de altura sobre el nivel del mar.

Altura (ft)	0	1920	2560	3200	3840	4480	5100	5760	6400	7040	8320
F_2	1	1.03	1.04	1.05	1.07	1.08	1.1	1.11	1.12	1.14	1.17

F_3 : Factor de corrección en función del refrigerante.

Refrigerante	R22	R134A	R404
F_3	1	1.02	1.05

$$Q_t = Q_r * F_1 * F_2 * F_3$$

Q_t = Calor total para seleccionar el condensador según valor de las tablas.

Q_r = Calor de rechazo según datos del compresor.

Fuente: THERMO-COIL LTDA. Serpentes, condensadores y evaporadores. [En línea]. [15 de agosto de 2020]. Disponible en: <https://thermocoil.com/wp-content/uploads/2018/04/serpentes.pdf>

Empleando esta guía proporcionada por el catálogo del fabricante, se realizó la corrección para su respectiva selección.

Ecuación 6. Ecuación de Calor total para seleccionar el condensador.

$$Q_t = Q_r * F_1 * F_2 * F_3$$

Fuente: elaboración propia con base THERMO-COIL LTDA. Serpentes, condensadores y evaporadores. [En línea]. [2018]. Disponible en: <https://thermocoil.com/wp-content/uploads/2018/04/serpentes.pdf>

Donde

$$Q_r: \text{Calor de rechazo} = 6,7445 \text{ kW}$$

$$F_1: \text{Factor 1 a } 24,61 \text{ }^\circ\text{F} = 1,0195$$

$$F_2: \text{Factor 2 a } 410,105 \text{ Ft} = 1,0064$$

$$F_3: \text{Factor 3 para R123a} = 1,02$$

Reemplazando los datos en la ecuación, se obtuvo:

$$Q_t = 6,7445 \text{ kW} * 1,0195 * 1,0064 * 1,02$$

$$Q_t = 7,05842 \text{ kW}$$

De tal manera, gracias a los valores obtenidos se seleccionó un condensador tipo CRT de 2 HP con un rendimiento de 8,007 kW y un caudal de 1600 CFM.

Tabla 26. Características generales del condensador tipo CRT

CARACTERÍSTICAS GENERALES														
ÍTEM	MODELO		FILAS N° TUBOS	REFERENCIA COMERCIAL	MEDIDAS (mm).				VENTILADOR		RENDIMIENTO		PESO (Kg)	
	CT	CRT			A	B	C	D	CAUDAL (CFM)	N° x DIA (mm)	BTUH	WATT	CT	CRT
1	00027		2 x 9	1/5 HP	230	245	90	270	480	1 x 200	2.949	864	1,5	3,8
2	00032		2 x 10	1/4 HP	265	285	90	305	480	1 x 200	3.220	943	1,8	4,1
3	00035		2 x 10	1/4 HP	305	285	90	345	520	1 x 200	3.620	1.061	2	4,3
4	00048		3 x 10	1/3 HP	265	285	120	305	660	1 x 250	5.554	1.627	2,2	5
5	00051		3 x 10	1/3 HP	305	285	120	345	724	1 x 250	6.307	1.848	2,5	5,3
6	00061		4 x 10	1/2 HP	265	285	140	305	600	1 x 250	6.799	1.992	2,7	5,5
7	00064		4 x 10	1/2 HP	305	285	140	345	700	1 x 250	7.963	2.333	3	5,8
8	00092		4 x 12	3/4 HP	315	335	150	355	780	1 x 300	9.650	2.827	4,1	7,1
9	00107		4 x 9	3/4 HP-D	485	245	130	525	860	2 x 200	10.710	3.138	5	9,6
10	00139		4 x 14	1 HP	400	365	150	440	820	1 x 300	14.093	4.129	5,8	8,3
11	00141		4 x 10	1 HP-D	560	285	140	600	1.250	2 x 250	14.280	4.184	6	11,6
12	00190		3 x 20	1 1/2 HP	540	520	180	580	1.630	1 x 400	22.742	6.663	8,5	13,5
13	00201		4 x 12	1 1/2 HP-D	660	335	140	700	1.450	2 x 250	22.590	6.619	8	13,6
14	00273		4 x 20	2 HP	540	520	180	580	1.600	1 x 400	27.328	8.007	12,5	17,5
15	00290		4 x 13	2 HP-D	815	340	150	855	1.800	2 x 300	29.365	8.604	10,7	16,7
16	00390		3 x 26	3 HP	635	720	160	695	3.150	1 x 500	40.114	11.753	14	22
17	00400		3 x 20	3 HP-D	865	520	160	925	3.200	2 x 350	40.501	11.867	14	24
18	00474		4 x 26	4 HP	635	670	180	695	2.950	1 x 500	47.389	13.885	17,5	26
19	00490		3 x 22	4 HP-D	1.015	580	160	1.075	3.600	2 x 350	49.282	14.440	16	26
20	00580		4 x 28	5 HP	635	720	190	695	4.500	1 x 500	57.500	16.848	19	28
21	00570		3 x 22	5 HP-D	1.120	580	170	1.180	4.300	2 x 400	57.246	16.773	18	30
22	00700		4 x 32	6 HP	815	820	190	875	4.316	1 x 500	70.831	20.753	36	45
23	00710		3 x 24	6 HP-D	1.270	630	180	1.330	5.800	2 x 450	74.589	21.855	34	40
24	00810		4 x 32	7 1/2 HP	1.015	820	300	1.075	4.700	1 x 630	81.000	23.733	48	63
25	00900		3 x 28	7 1/2 HP-D	1.270	730	210	1.340	6.500	2 x 450	88.960	26.065	49	65
26	01100		3 x 28	8 HP-D	1.524	730	210	1.594	8.700	2 x 500	107.860	31.638	52	58
27	01320		4 x 28	10 HP-D	1.525	730	250	1.595	8.200	2 x 500	128.350	37.607	54	71,6
28	01380		4 x 32	12 HP-D	1.525	835	250	1.595	8.600	2 x 500	138.000	40.434	77	94
29	01700		4 x 36	15 HP-D	1.780	935	250	1.850	10.200	2 x 630	161.400	47.290	93	123
30	01900		4 x 40	20 HP-D	2.030	1.035	250	2.100	10.600	2 x 630	187.600	54.967	120	150
31	02240		4 x 42	25 HP	2.160	1.085	220	2.230	9.500	3 x 500	226.980	66.505	135	161,4
32	02800		4 x 46	30 HP	2.160	1.190	220	2.230	13.000	4 x 500	277.100	81.190	160	195,2

Fuente: THERMO-COIL LTDA. Serpentes, condensadores y evaporadores. [En línea]. [15 de agosto de 2020]. Disponible en: <https://thermocoil.com/wp-content/uploads/2018/04/serpentes.pdf>

3.2.3 Selección del compresor. Para la selección correcta del compresor, se llevaron a cabo los cálculos respectivos.

Ecuación 7. Ecuación de Trabajo del compresor.

$$\dot{w} = \dot{m}_R * (h_2 - h_1)$$

Fuente: elaboración propia con base en ÇENGEL, Yunus y BOLES, Michael. Termodinámica. Séptima edición. México: Mc-Graw Hill, 2011.

Donde

\dot{w} : Trabajo del compresor.

$$\dot{m}_R: \text{Flujo másico del refrigerante} = 35 \frac{\text{lb}}{\text{min}} = 0,264596 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$h_2: \text{Entalpía en el compresor} = 271,5188 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_1 = h_g: \text{Entalpía en el evaporador} = 234,2051 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Conociendo los datos y reemplazando en la ecuación, se obtuvo:

$$\dot{w} = 0,264596 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * (271,5188 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 234,2051 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}})$$

$$\dot{w} = 9,8730 \text{ kW}$$

Para la selección adecuada del compresor, se empleó un catálogo de la empresa EMERSON de compresores semiherméticos para refrigerante R-134a, en el cual se debe tener en cuenta la temperatura de evaporación, la cual es de -26,7470 °C, y la capacidad frigorífica que requiere el compresor la cual es de 9,8730 Kw.

Imagen 9. Compresor semihermético



Fuente: EMERSON. Catálogo general de productos 2019 para refrigeración, aire acondicionado y bombas de calor. [En línea]. [s.f.]. Disponible en: <https://climate.emerson.com/documents/cope-land-y-alco-controls-catalogo-general-de-productos-2019-es-es-5375994.pdf>.

Tabla 27. Datos técnicos para la selección del compresor

Temperatura de condensación: 40°C															
R134a	Capacidad frigorífica (kW)							R134a	Potencia absorbida (kW)						
	Temperatura de evaporación (°C)								Temperatura de evaporación (°C)						
Modelo	-45	-35	-30	-20	-10	-5	+5	Modelo	-45	-35	-30	-20	-10	-5	+5
4MAD-22X		4,0*	6,2*	11,8*	20,0*	25,4*	39,7	4MAD-22X		3,7*	4,4*	5,9*	7,3*	7,9*	8,7
4MFD-13X				12,1	20,2	25,4	38,5	4MFD-13X				5,8	7,2	7,8	8,7
4MHD-25X		4,4*	6,9*	13,5*	23,1*	29,3*	45,9	4MHD-25X		4,7*	5,4*	7,1*	8,7*	9,4*	10,4
4MLD-15X				14,8	24,2	30,2	45,5	4MLD-15X				6,9	8,5	9,3	10,4
4MID-30X		5,2*	8,0*	15,1*	25,4*	32,2*	50,2	4MID-30X		4,9*	5,8*	7,6*	9,4*	10,3*	11,4
4MMD-20X				16,5	26,7	33,3	49,8	4MMD-20X				7,7	9,4	10,2	11,4
4MJD-33X		6,0*	9,1*	17,0*	28,5*	35,9*	55,9	4MJD-33X		5,6*	6,6*	8,7*	10,7*	11,5*	12,8
4MTD-22X				18,9	30,3	37,7	56,7	4MTD-22X				8,7	10,8	11,7	13,1
4MKD-35X		7,0*	10,4*	19,1*	31,9*	40,3*	62,7	4MKD-35X		7,1*	7,7*	9,7*	12,2*	13,3*	14,9
4MUD-25X				20,5	33,5	41,9	63,2	4MUD-25X				9,8	12,2	13,3	15,1
6MID-40X				22,2*	37,6*	47,8*	75,3	6MID-40X				12,0*	14,6*	15,8*	17,8
6MMD-30X				24,9	40,3	50,2	75,3	6MMD-30X				11,7	14,6	15,8	17,7
6MJD-45X				25,6*	42,7*	54,0*	84,5	6MJD-45X				13,0*	16,2*	17,8*	20,3
6MTD-35X				28,2	45,5	56,5	84,4	6MTD-35X				13,3	16,5	17,9	20,0
6MKD-50X				26,2*	45,7*	58,6*	93,4	6MKD-50X				15,2*	18,8*	20,5*	23,3
6MUD-40X				31,2	50,1	62,3	93,6	6MUD-40X				14,6	18,4	20,1	23,0

Condiciones: Retorno de gas de aspiración 20 °C, Subenfriamiento 0 K, carga 100%.
 * Condiciones: Recalentamiento de aspiración 10 K, subenfriamiento 0 K.

Fuente: EMERSON. Catálogo general de productos 2019 para refrigeración, aire acondicionado y bombas de calor. [En línea]. [s.f.]. Disponible en: <https://climate.emerson.com/documents/copeland-y-alco-controls-catalogo-general-de-productos-2019-es-es-5375994.pdf>.

Con los datos mencionados anteriormente se procede a realizar la respectiva selección del compresor, donde se elige un compresor con una capacidad frigorífica de 10,4 kW, con una temperatura de evaporación de -30°C y una potencia absorbida de 7,7 kW.

3.2.4 Selección de la válvula de expansión. Para la selección de la válvula de expansión se realizó el cálculo de la capacidad frigorífica de este componente, el cual se expone en la siguiente ecuación:

Ecuación 8. Ecuación de Capacidad frigorífica de la válvula de expansión.

$$\dot{Q}_O = \dot{m}_R x (h_o - h_c)$$

Fuente: elaboración propia con base en ÇENGEL, Yunus y BOLES, Michael. Termodinámica. Séptima edición. México: Mc-Graw Hill, 2011.

Donde

$$\dot{m}_R: \text{Flujo másico del refrigerante} = 35 \frac{\text{lb}}{\text{min}} = 0,264596 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$h_0: h_g \text{ a la salida del evaporador} = 234,2051 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_c: h_{fg} \text{ en el evaporador} = 217,4064 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Reemplazando los datos de la ecuación anterior, se obtuvo el siguiente resultado para la capacidad frigorífica de la válvula de expansión:

$$\dot{Q}_0 = 0,264596 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times \left(234,2051 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 217,4064 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$$

$$\dot{Q}_0 = 4,4448 \text{ kW}$$

Por lo anterior, se procedió a seleccionar la válvula de expansión termostática más apropiada para el proyecto. De acuerdo con el catálogo del fabricante de la empresa Parker Sporlan, se debe emplear una válvula de expansión termostática de tipo RJE de 1-1/2 para refrigerante 134a con una capacidad frigorífica de 5,25 kW.

Tabla 28. Especificaciones de la válvula de expansión termostática de tipo RJE

Especificaciones

REFRIGERANTE (Código Sporlan)	TIPO DE VALVULA	CAPACIDAD NOMINAL kW de REFRIGERACIÓN	TAMAÑO DE ELEMENTO	CARGAS TERMOSTÁTICAS DISPONIBLES	LONGITUD DE TUBO ESTÁNDAR mm	CONEXIÓN – pulgadas [Ⓞ] ODF		PESO NETO – kg	PESO DE TRANSPORTE kg
						ENTRADA	SALIDA		
407C (N) 22 (V)	RNE-1	3,5	43	C CP100 GA Z ZP40	1.5	3/8	1/2	0,45	0,68
	RNE-1-1/2	5,25							
	RNE-2	7							
	RNE-3	10,5							
	RNE-4	14							
	RNE-5	17,5							
	RNE-6	21	45-5			1/2	5/8		
	RNE-8	28				5/8	7/8		
	RNE-10	35				5/8	7/8 Ext.		
	RNE-12	42				5/8	7/8 Ext.		
134a (J) 409A (F)	RJE-1/2	1,75	43	C	1.5	3/8	1/2	0,45	0,68
	RJE-1	3,5							
	RJE-1-1/2	5,25							
	RJE-2	7							
	RJE-2-1/2	8,75							
404A (S) 507 (P)	RJE-3	10,5	43	C Z ZP	1.5	3/8	1/2	0,45	0,68
	RJE-4	14							
	RSE-1/2	1,75							
	RSE-1	3,5							
	RSE-1-1/2	5,25							
	RSE-2	7							
410A (Z)	RSE-3	10,5	45	CP200 GA	1.5	3/8	1/2	0,45	0,68
	RSE-3-1/2	12,25							
	RSE-4	14							
	RZE-1	4,20							
	RZE-1-1/2	7,35							
	RZE-2	9,66							
	RZE-3	13,4							
	RZE-4	17,6							
	RZE-5	21,0							
	RZE-6	25,2							
RZE-8	33,6	45-5	1/2	5/8					
RZE-12-1/2	43,8		5/8	7/8					
RZE-15	50,8	5/8	7/8 Ext.						

Ⓞ Bajo pedido especial, estas válvulas también están disponibles con conexiones SAE.

Nota: las válvulas con racores de entrada y salida SAE sólo están disponibles con el equalizador externo 1/4" SAE roscar; las válvulas con racores ODF sólo están disponibles con el equalizador externo 1/4" ODF.

Nota: las válvulas se pueden suministrar con equalizador interno en los modelos con una capacidad nominal de 2 o menos.

Fuente: EMERSON. Catálogo general de productos 2019 para refrigeración, aire acondicionado y bombas de calor. [En línea]. [s.f.]. Disponible en: <https://climate.emerson.com/documents/copeland-y-alco-controls-catalogo-general-de-productos-2019-es-es-5375994.pdf>

3.2.5 Selección de la tubería para el sistema de refrigeración. Puesto que no hubo ningún requerimiento especial con respecto al tipo de tubería a emplear, se decidió, con plena libertad, realizar la selección a criterio del diseñador. Para ello, se seleccionó una tubería de cobre tipo L de 1" ¼, ya que esta se caracteriza por ser una tubería de un material fuerte y resistente a la corrosión, además de presentar una resistencia constante ante las presiones internas de trabajo.

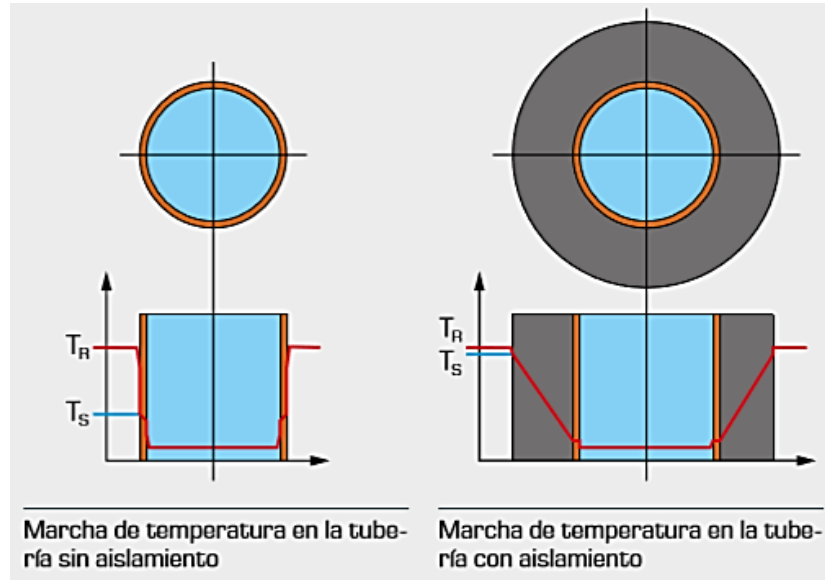
Tabla 29. Tubería de cobre tipo L

TIRAS RECTAS						
TIPO	Diámetro Nominal en Pulgadas	Diámetro Ext. efectivo en Pulgadas	Espesor de pared en mm	Presión Máxima Permitida		Peso Kg.Mt
				Kg/m ²	Lib.Pulg ²	
K	1/4	3/8	0,89	85	1.210	0,216
	3/8	1/2	1,24	89	1.255	0,397
	1/2	5/8	1,24	70	995	0,506
	3/4	7/8	1,65	66	938	0,950
	1	1. 1/8	1,65	51	725	1,25
	1. 1/4	1. 3/8	1,65	41	583	1,54
	1. 1/2	1. 5/8	1,83	38	540	2,02
	2	2. 1/8	2,11	34	483	3,06
	2. 1/2	2. 5/8	2,41	31	441	4,35
	3	3. 1/8	2,77	30	427	5,94
	4	4. 1/8	3,40	28	396	9,65
5	5. 1/8	4,06	27	384	14,34	
L	1/4	3/8	0,76	71	1.010	0,187
	3/8	1/2	0,89	62	882	0,295
	1/2	5/8	1,02	57	810	0,424
	3/4	7/8	1,14	45	840	0,673
	1	1. 1/8	1,27	39	555	0,971
	1. 1/4	1. 3/8	1,40	35	498	1,31
	1. 1/2	1. 5/8	1,52	32	455	1,59
	2	2. 1/8	1,78	28	398	2,50
	2. 1/2	2. 5/8	2,03	26	370	3,59
	3	3. 1/8	2,29	25	355	4,94
4	4. 1/8	2,79	23	327	7,95	
5	5. 1/8	3,17	21	299	11,27	
M	3/8	1/2	0,64	44	626	0,216
	1/2	5/8	0,71	39	555	0,304
	3/4	7/8	0,81	31	441	0,485
	1	1. 1/8	0,89	27	384	0,692
	1. 1/4	1. 3/8	1,07	26	370	1,01
	1. 1/2	1. 5/8	1,24	26	370	1,40
	2	2. 1/8	1,47	23	327	2,16
	2. 1/2	2. 5/8	1,65	21	299	3,02
	3	3. 1/8	1,83	20	284	3,97
	4	4. 1/8	2,41	20	284	6,90
5	5. 1/8	2,77	18	256	9,91	

Fuente: elaboración propia con base en TUVALREP. Tubería rígida sobre tipo M, L y K. [En línea]. [2020]. Disponible en: <https://tuvalrep.com.co/producto/tuberia-rigida-cobre-nacobre/>

3.2.6 Selección del aislante para la tubería

Figura 18. Aislante para la tubería



Fuente: GUNT. Tuberías en la refrigeración. [En línea]. [s.f.]. Disponible en: https://gunt.de/images/download/piping_spanish.pdf, p. 115

Los materiales metálicos utilizados en las tuberías de refrigerante poseen una alta conductibilidad térmica para que la temperatura superficial T_s de la tubería corresponda aprox. a la temperatura del refrigerante. Con el aire ambiente (temperatura T_R) puede cambiarse así mucho calor. Mediante el recubrimiento de la tubería con un revestimiento aislante, la temperatura superficial se adapta a la temperatura ambiente y se reduce la transición térmica. Con tuberías frías, se mantiene así la temperatura superficial T_s a través de la temperatura del punto de rocío y se evita una condensación o congelación de la humedad del aire. El agua de condensación que gotea puede dar lugar a daños de corrosión y humedad.⁴⁴

⁴⁴ GUNT. Tuberías en la refrigeración. [En línea]. [s.f.]. Disponible en: https://gunt.de/images/download/piping_spanish.pdf, p. 115.

Tabla 30. Espesores mínimos de aislamiento (mm y pulg) de tuberías y accesorios que transportan fluidos fríos que discurren por el exterior de edificaciones

Diámetro exterior		Temperatura mínima del fluido					
		°C			°F		
mm	pulg	> -10 ... 0	> 0 ... 10	> 10	> 14 ... 32	> 32 ... 50	> 50
D < 35	D < 1 1/2	50	40	40	2	1 1/2	1 1/2
35 < D ≤ 60	1 1/2 < D ≤ 2 1/2	60	50	40	2 1/2	2	1 1/2
60 < D ≤ 90	2 1/2 < D ≤ 3 1/2	60	50	50	2 1/2	2	2
90 < D ≤ 140	3 1/2 < D ≤ 5 1/2	70	60	50	3	2 1/2	2
140 < D	5 1/2 < D	70	60	50	3	2 1/2	2

Fuente: elaboración propia con base en CONSEJO COLOMBIANO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA. Reglamento técnico de instalaciones térmicas en edificaciones. RITE 2017. [En línea]. [2017]. Disponible en: http://www.cceecol.org/images/archivos/Biblioteca/RITE_2017_FINAL.pdf

Teniendo en cuenta la norma RITE, el espesor mínimo seleccionado para una tubería de cobre de 1" ¼ es de 50 mm. Por ello, se seleccionó un aislante térmico Armaflex XG Armacell, el cual es recomendado para este tipo de proceso.

Imagen 10. Aislante térmico Armaflex XG
Armacell

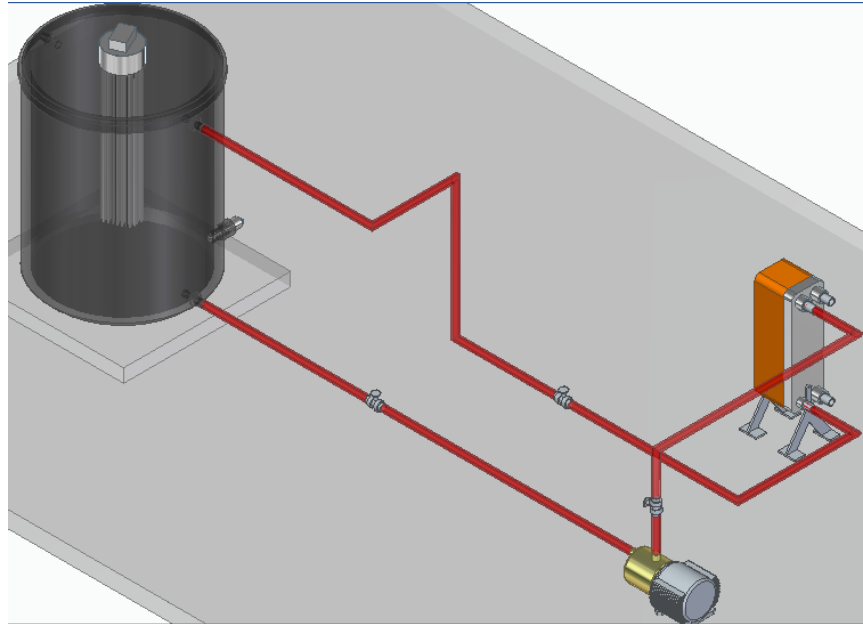


Fuente: CONSEJO COLOMBIANO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA. Reglamento técnico de instalaciones térmicas en edificaciones. RITE 2017. [En línea]. [2017]. Disponible en: http://www.cceecol.org/images/archivos/Biblioteca/RITE_2017_FINAL.pdf

3.3 DISEÑO DETALLADO DEL SISTEMA HIDRÁULICO

El sistema hidráulico del presente proyecto lo conforma un tanque de almacenamiento de agua, una bomba hidráulica, tuberías en PVC para agua caliente, una válvula universal tipo globo y dos válvulas de retención oscilante.

Figura 19. Sistema hidráulico



Fuente: elaboración propia

Posteriormente se procede a seleccionar los diferentes componentes que lo conforman, y así mismo, se procede a calcular las pérdidas en las tuberías, por lo cual, se tomó la decisión de dividirlos en secciones.

3.3.1 Selección del tanque de agua. En tanto que no hubo ningún requerimiento especial con respecto a las dimensiones del tanque de almacenamiento de agua, se decidió, con plena libertad, realizar la selección a criterio del diseñador. Para tal propósito, se seleccionó un tanque cilíndrico con capacidad de 500 L, para así no sobredimensionar el sistema de evaporación de refrigerante ya que 500L de agua son suficiente para generar el caudal de agua necesario para el sistema.

Imagen 11. Tanque cilíndrico



TANQUES CILÍNDRICOS
AGUA 250 L / **500 L** / 1000 L / 2000 L

Fuente: elaboración propia con base en COLEMPAQUES. Almacenamiento de agua. [En línea]. [2020]. Disponible en: <https://www.colempaques.com/almacenamiento-de-agua>

3.3.2 Diseño y selección de la tubería. Teniendo en cuenta las conexiones del tanque, se optó por implementar una tubería comercial en PVC para agua caliente con un diámetro de 1"1/4, con el objetivo de reducir los costos en el proyecto.

Tabla 31. Diseño y selección de la tubería

Presión de trabajo a 100 psi, (125) psi a 82 °C
(valor de norma 100 psi a 82 °C)

Diám. Nominal		Referencia	Peso g/m	Diámetro Ext.Prom.		Espesor de Pared Mín.		Longitud Tubo
mm	pulg.			mm	pulg.	mm	pulg.	
Los diámetros nominales se refieren a tamaños "COBRE" siendo las roscas NPT		2910217	129	15.88	0.625	1.73	0.068	3
		2910219	218	22.23	0.875	2.03	0.080	3
		2910221	320	28.60	1.125	2.59	0.102	3
La Tubería para agua caliente no debe roscarse		2910222	500	35.05	1.380	3.30	0.130	6
		2910223	690	41.90	1.630	3.81	0.150	6
		2910224	1180	54.10	2.130	4.83	0.190	6

Fuente: elaboración propia con base en PAVCO WAVIN. Tubería CPVC para agua caliente – HotPro. [En línea]. [2020]. Disponible en: <https://pavcowavin.com.co/tuberia-hotpro-para-agua-caliente>

Para el cálculo correspondiente del caudal en el sistema hidráulico, al no haber ningún requerimiento especial con respecto a las temperaturas del agua de entrada y salida en el evaporador, se decidió, con plena libertad, establecer una temperatura de entrada del agua al evaporador de 50 °C y una temperatura de salida del agua de 20 °C.

Ecuación 9. Flujo másico del agua.

$$\dot{m}_R * h_{fg} = \dot{m}_{H_2O} * (h_2 - h_1)$$

Fuente: elaboración propia con base en ÇENGEL, Yunus y BOLES, Michael. Termodinámica. Séptima edición. México: Mc-Graw Hill, 2011.

Donde

$$\dot{m}_R: \text{Flujo másico del refrigerante} = 35 \frac{\text{lb}}{\text{min}} = 0,264596 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$h_g: \text{Entalpía en el evaporador} = 234,2051 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

\dot{m}_{H_2O} : Flujo másico del agua

$$h_2: \text{Entalpía del agua a } 50 \text{ }^\circ\text{C} = 209,34 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_1: \text{Entalpía del agua a } 20 \text{ }^\circ\text{C} = 83,915 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Reemplazando los datos en la ecuación anterior, se obtuvo el valor del flujo másico del agua:

$$0,264596 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 234,2051 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = \dot{m}_{H_2O} * (209,34 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 83,915 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}})$$

$$\dot{m}_{H_2O} = 0,494077 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Además, con este dato se pudo calcular el caudal correspondiente para el respectivo cálculo de las pérdidas de energía en el sistema hidráulico y la respectiva selección de la bomba hidráulica.

Ecuación 10. Ecuación de Caudal del agua.

$$Q = \frac{\dot{m}_{H_2O}}{\rho}$$

Fuente: elaboración propia con base en ÇENGEL, Yunus y BOLES, Michael. Termodinámica. Séptima edición. México: Mc-Graw Hill, 2011.

Donde

$$Q: \text{Caudal del agua } \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)$$

$$\dot{m}_{H_2O}: \text{Flujo másico del agua} = 0,494077 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\rho = \text{Densidad del agua} = 995,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Reemplazando los datos en la ecuación, se obtuvo lo siguiente:

$$Q = \frac{0,494077 \frac{kg}{s}}{995,2 \frac{Kg}{m^3}}$$

$$Q = 4,7189 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}$$

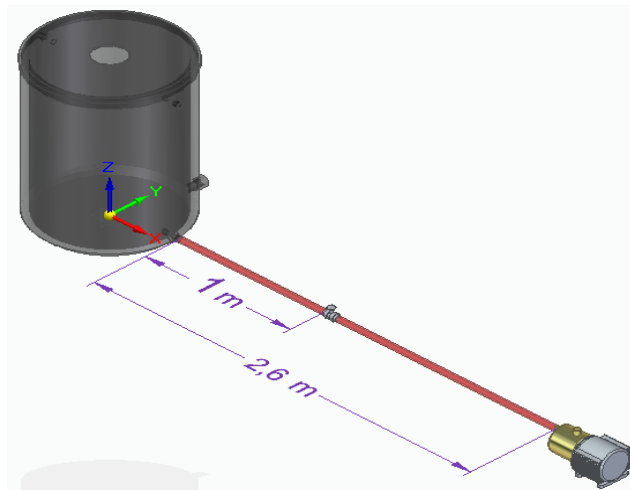
$$Q = 28,3134 \frac{L}{min}$$

Teniendo en cuenta los datos obtenidos anterior mente se procede a calcular las pérdidas de energía, se decidió dividir por secciones el sistema hidráulico, el cual, cuenta con una tubería en PVC para agua caliente ya que por esta circula agua a una temperatura de 50°C, la cual tiene un diámetro exterior de 35,05 mm y un espesor de pared de 3,30 mm, también se conoce el caudal que se requiere que circule por esta tubería, de $4,7189 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}$, conociendo estos datos se procede a calcular las perdidas en las diferentes secciones del sistema hidráulico.

- **Sección A**

La sección A comprende el tramo de tubería que se encuentra del tanque a la bomba hidráulica seleccionados, estableciendo una longitud de 2,6 m, con el propósito de reducir las pérdidas en la tubería.

Figura 20. Sección A



Fuente: elaboración propia.

Ecuación 11. Ecuación del Diámetro interior de la tubería.

$$\phi_{Int} = \phi_{Ext} - \Delta X$$

Fuente: elaboración propia con base en MOTT, Robert. Mecánica de fluidos. Sexta edición. México: Pearson Educación, 2006.

Donde

ϕ_{Int} : *Diámetro interior*

ϕ_{Ext} : *Diámetro exterior* = 35,05 mm

ΔX : *Espesor de la tubería* = 3,30 mm

Reemplazando en la ecuación anterior se obtiene el diámetro interior de la tubería seleccionada, dando así el siguiente resultado.

$$\phi_{Int} = 35,05 \text{ mm} - 3,30 \text{ mm}$$

$$\phi_{Int} = 31,75 \text{ mm}$$

Con este resultado se procede a realizar los respectivos cálculos para obtener las pérdidas de energía.

Ecuación 12. Ecuación del área de flujo.

$$A = \pi \frac{(\phi_{Int})^2}{4}$$

Fuente: MOTT, Robert. Mecánica de fluidos. Sexta edición. México: Pearson Educación, 2006.

Donde

ϕ_{Int} : *Diámetro interior* = 31,75 mm = 0,03175 m

Reemplazando

$$A = \pi \frac{(0,03175 \text{ m})^2}{4} = 7,9173 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Conociendo el área de flujo se realiza en cálculo de la velocidad correspondiente.

Ecuación 13. Ecuación de velocidad del fluido.

$$V_{el} = \frac{Q}{A}$$

Fuente: elaboración propia con base en MOTT, Robert. Mecánica de fluidos. Sexta edición. México: Pearson Educación, 2006.

Donde

$$Q: \text{Caudal} = 4,7189 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}$$

V_{el} : Velocidad del fluido

$$A: \text{Area de flujo} = 7,9173 \times 10^{-4} m^2$$

Reemplazando se obtiene.

$$V_{el} = \frac{4,7189 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}}{7,9173 \times 10^{-4} m^2} = 0,5960 \frac{m}{s}$$

Con el dato obtenido se procede a calcular el número de Reynolds.

Ecuación 14. Ecuación número de Reynolds sección A.

$$N_R = \frac{V_{el} * \phi_{int}}{\vartheta}$$

Fuente: MOTT, Robert. Mecánica de fluidos. Sexta edición. México: Pearson Educación, 2006.

Donde

N_R : Numero de Reynolds

$$V_{el}: \text{Velocidad del fluido} = 0,5960 \frac{m}{s}$$

$$\phi_{int}: \text{Diametro interior} = 31,75 \text{ mm} = 0,03175 \text{ m}$$

$$\nu: \text{Viscosidad cinemática} = 5,48 \times 10^{-7} \frac{m^2}{s}$$

Reemplazando en la ecuación anterior se obtiene.

$$N_R = \frac{0,5960 \frac{m}{s} * 0,03175 m}{5,48 \times 10^{-7} \frac{m^2}{s}} = 3,4531 \times 10^4$$

Con este resultado podemos concluir que tenemos un flujo turbulento en la tubería, y con el cual se procede a calcular el factor de fricción para flujos turbulentos.

Ecuación 15. Factor de fricción sección A.

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{1}{3,7 \left(\frac{\phi_{int}}{E} \right)} + \frac{5,74}{(N_R)^{0,9}} \right) \right]^2}$$

Fuente: MOTT, Robert. Mecánica de fluidos. Sexta edición. México: Pearson Educación, 2006.

Donde

f : Factor de fricción

ϕ_{int} : Diámetro interior = 31,75 mm = 0,03175 m

E : Rugosidad del plástico = $3,0 \times 10^{-7}$ m

N_R : Número de Reynolds = $3,4531 \times 10^4$

Reemplazando en la ecuación anterior se obtiene.

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{1}{3,7 \left(\frac{0,03175 m}{3,0 \times 10^{-7} m} \right)} + \frac{5,74}{(3,4531 \times 10^4)^{0,9}} \right) \right]^2}$$

$$f = 0,02263$$

Conociendo el factor de fricción se procede a calcular las pérdidas por fricción y por accesorios.

Ecuación 16. Ecuación de pérdidas de energía por fricción sección A.

$$h_L = f \left(\frac{L}{\phi_{int}} \right) \left(\frac{(V_{el})^2}{2(g)} \right)$$

Fuente: MOTT, Robert. Mecánica de fluidos. Sexta edición. México: Pearson Educación, 2006.

Donde:

h_L : Pérdidas por fricción

L : Longitud de la tubería = 2,6 m

ϕ_{Int} : Diametro interior = 31,75 mm = 0,03175 m

V_{el} : Velocidad del fluido = $0,5960 \frac{m}{s}$

g : Gravedad = $9,81 \frac{m}{s^2}$

f : Factor de fricción = 0,02263

Reemplazando en la ecuación anterior se obtiene.

$$h_L = (0,02263) \left(\frac{2,6 m}{0,03175 m} \right) \left(\frac{\left(0,5960 \frac{m}{s} \right)^2}{2 \left(9,81 \frac{m}{s^2} \right)} \right)$$

$$h_L = 0,03355 m$$

Obteniendo las pérdidas por fricción en la tubería se procede a calcular las perdidas por accesorios, ya que esta sección A tiene una válvula universal tipo globo.

Ecuación 17. Ecuación de pérdidas de energía por accesorios sección A.

$$h_L = K \left(\frac{(V_{el})^2}{2(g)} \right)$$

Fuente: MOTT, Robert. Mecánica de fluidos. Sexta edición. México: Pearson Educación, 2006.

Donde:

h_L : Pérdidas por accesorios

K : Perdidas menores

V_{el} : Velocidad del fluido = $0,5960 \frac{m}{s}$

g : Gravedad = $9,81 \frac{m}{s^2}$

El cálculo de las pérdidas menores es igual a:

Ecuación 18. Ecuación de pérdidas menores sección A.

$$K = \left(\frac{L_e}{D} \right) f_T$$

Fuente: MOTT, Robert. Mecánica de fluidos. Sexta edición. México: Pearson Educación, 2006.

Donde:

$\frac{L_e}{D}$: Válvula de globo – abierta por completo = 340

f_T : Factor de fricción = 0,02263

Reemplazando en la ecuación anterior se obtiene el valor de las pérdidas menores para esta sección.

$$K = (340) * 0,02263$$

$$K = 7,6942$$

Obteniendo el valor de las pérdidas menores, se procede a calcular las pérdidas por accesorios.

$$h_L = 7,6942 \left(\frac{\left(0,5960 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \left(9,81 \frac{m}{s^2}\right)} \right)$$
$$h_L = 0,1393 \text{ m}$$

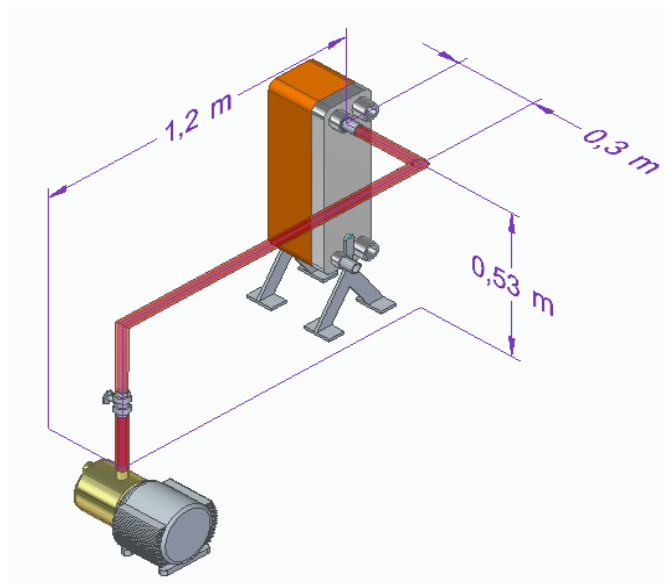
Las pérdidas totales de la sección A son:

$$h_{L,T} = 0,03355 \text{ m} + 0,1393 \text{ m}$$
$$h_{L,T} = 0,1728 \text{ m}$$

- **Sección B**

La sección B se encuentra comprendida entre la bomba hidráulica y el intercambiador de calor seleccionados para el proyecto, con una longitud de tubería de 2,03 m.

Figura 21. Sección B



Fuente: elaboración propia

Conociendo los datos anteriores se procede a calcular las pérdidas en la sección B.

Ecuación 19. Ecuación de pérdidas de energía por fricción sección B.

$$h_L = f \left(\frac{L}{\phi_{int}} \right) \left(\frac{(V_{el})^2}{2(g)} \right)$$

Fuente: MOTT, Robert. Mecánica de fluidos. Sexta edición. México: Pearson Educación, 2006.

Donde:

h_L : Pérdidas por fricción

L : Longitud de la tubería = 2,03 m

ϕ_{Int} : Diametro interior = 31,75 mm = 0,03175 m

V_{el} : Velocidad del fluido = $0,5960 \frac{m}{s}$

g : Gravedad = $9,81 \frac{m}{s^2}$

f : Factor de fricción = 0,02263

Reemplazando en la ecuación anterior se obtiene las perdidas por fricción.

$$h_L = (0,02263) \left(\frac{2,03 \text{ m}}{0,03175 \text{ m}} \right) \left(\frac{\left(0,5960 \frac{m}{s} \right)^2}{2 \left(9,81 \frac{m}{s^2} \right)} \right)$$

$$h_L = 0,02619 \text{ m}$$

La sección B la compone una válvula de retención tipo oscilante y dos codos estándar de 90°.

Ecuación 20. Ecuación de pérdidas de energía por accesorios sección B.

$$h_L = K \left(\frac{(V_{el})^2}{2(g)} \right)$$

Fuente: MOTT, Robert. Mecánica de fluidos. Sexta edición. México: Pearson Educación, 2006.

Donde

h_L : Pérdidas por accesorios

K : Pérdidas menores

V_{el} : Velocidad del fluido = $0,5960 \frac{m}{s}$

g : Gravedad = $9,81 \frac{m}{s^2}$

El cálculo de las pérdidas menores es igual a:

Ecuación 21. Ecuación de pérdidas menores sección B.

$$K = \left(\frac{L_e}{D} \right) f_T$$

Fuente: MOTT, Robert. Mecánica de fluidos. Sexta edición. México: Pearson Educación, 2006.

Donde:

$\frac{L_e}{D}$: Válvula de retención – Tipo oscilante = 100

f_T : Factor de fricción = 0,02263

Reemplazando en la ecuación anterior se obtiene el valor de las pérdidas menores para la válvula de retención tipo oscilante.

$$K = (100) * 0,02263$$

$$K = 2,263$$

Obteniendo el valor de las pérdidas menores, se procede a calcular las pérdidas por accesorios para una válvula de retención tipo oscilante.

$$h_L = 2,263 \left(\frac{\left(0,5960 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \left(9,81 \frac{m}{s^2}\right)} \right)$$

$$h_L = 0,04097 \text{ m}$$

Para el cálculo de las pérdidas por accesorios para los codos estándar de 90° se obtiene:

El cálculo de las pérdidas menores es igual a:

$$K = \left(\frac{L_e}{D}\right) f_T$$

Donde:

$$\frac{L_e}{D}: \text{Codo estandar de } 90^\circ = 30$$

$$f_T: \text{Factor de fricción} = 0,02263$$

Reemplazando en la ecuación anterior se obtiene el valor de las pérdidas menores para la válvula de retención tipo oscilante.

$$K = (30) * 0,02263$$

$$K = 0,6789$$

Obteniendo el valor de las pérdidas menores, se procede a calcular las pérdidas por accesorios para una válvula de retención tipo oscilante.

$$h_L = (2)(0,6789) \left(\frac{\left(0,5960 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \left(9,81 \frac{m}{s^2}\right)} \right)$$

$$h_L = 0,02458 \text{ m}$$

Las pérdidas totales de la sección B son:

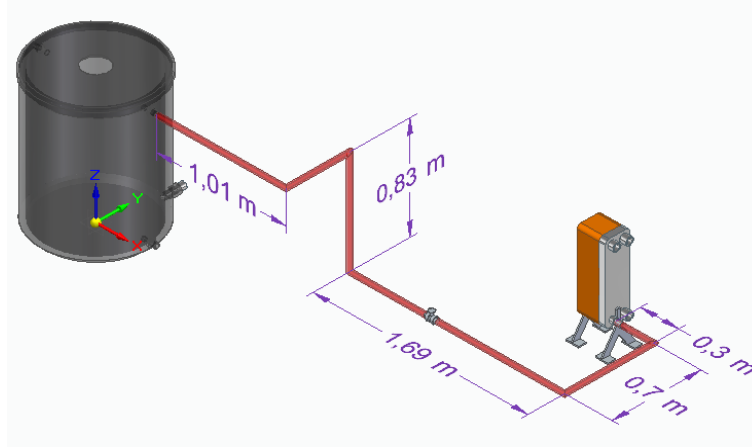
$$h_{LT} = 0,02619 \text{ m} + 0,04097 + 0,02458 \text{ m}$$

$$h_{LT} = 0,09174 \text{ m}$$

- **Sección C**

La sección C se encuentra comprendida entre el intercambiador de placas y el tanque de almacenamiento del agua, con una longitud de tubería de 4,53 m.

Figura 22. Sección C



Fuente: elaboración propia

Para el cálculo de las pérdidas en la sección C, se procede a realizar el siguiente procedimiento.

Ecuación 22. Ecuación de pérdidas de energía por fricción sección C.

$$h_L = f \left(\frac{L}{\phi_{int}} \right) \left(\frac{(V_{el})^2}{2(g)} \right)$$

Fuente: MOTT, Robert. Mecánica de fluidos. Sexta edición. México: Pearson Educación, 2006.

Donde:

h_L : Pérdidas por fricción

L : Longitud de la tubería = 4,53 m

ϕ_{Int} : Diametro interior = 31,75 mm = 0,03175 m

V_{el} : Velocidad del fluido = $0,5960 \frac{m}{s}$

$$g: \text{Gravedad} = 9,81 \frac{m}{s^2}$$

$$f: \text{Factor de fricción} = 0,02263$$

Reemplazando en la ecuación anterior se obtiene las pérdidas por fricción.

$$h_L = (0,02263) \left(\frac{4,53 \text{ m}}{0,03175 \text{ m}} \right) \left(\frac{\left(0,5960 \frac{m}{s} \right)^2}{2 \left(9,81 \frac{m}{s^2} \right)} \right)$$

$$h_L = 0,05845 \text{ m}$$

La sección C la compone una válvula de retención tipo oscilante y cinco codos estándar de 90°.

Ecuación 23. Ecuación de pérdidas de energía por accesorios sección C.

$$h_L = K \left(\frac{(V_{el})^2}{2(g)} \right)$$

Fuente: MOTT, Robert. Mecánica de fluidos. Sexta edición. México: Pearson Educación, 2006.

Donde

h_L : Pérdidas por accesorios

K : Pérdidas menores

$$V_{el}: \text{Velocidad del fluido} = 0,5960 \frac{m}{s}$$

$$g: \text{Gravedad} = 9,81 \frac{m}{s^2}$$

El cálculo de las pérdidas menores es igual a:

Ecuación 24. Ecuación de pérdidas menores sección C.

$$K = \left(\frac{L_e}{D}\right) f_T$$

Fuente: MOTT, Robert. Mecánica de fluidos. Sexta edición.
México: Pearson Educación, 2006.

Donde:

$$\frac{L_e}{D}: \text{Válvula de retención – Tipo oscilante} = 100$$

$$f_T: \text{Factor de fricción} = 0,02263$$

Reemplazando en la ecuación anterior se obtiene el valor de las pérdidas menores para la válvula de retención tipo oscilante.

$$K = (100) * 0,02263$$

$$K = 2,263$$

Obteniendo el valor de las pérdidas menores, se procede a calcular las pérdidas por accesorios para una válvula de retención tipo oscilante.

$$h_L = 2,263 \left(\frac{\left(0,5960 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \left(9,81 \frac{m}{s^2}\right)} \right)$$

$$h_L = 0,04097 \text{ m}$$

Para el cálculo de las pérdidas por accesorios para los codos estándar de 90° se obtiene:

El cálculo de las pérdidas menores es igual a:

$$K = \left(\frac{L_e}{D}\right) f_T$$

Donde:

$$\frac{L_e}{D}: \text{Codo estandar de } 90^\circ = 30$$

$$f_T: \text{Factor de fricción} = 0,02263$$

Reemplazando en la ecuación anterior se obtiene el valor de las pérdidas menores para la válvula de retención tipo oscilante.

$$K = (30) * 0,02263$$

$$K = 0,6789$$

Obteniendo el valor de las pérdidas menores, se procede a calcular las pérdidas por accesorios para una válvula de retención tipo oscilante.

$$h_L = (5)(0,6789) \left(\frac{\left(0,5960 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \left(9,81 \frac{m}{s^2}\right)} \right)$$

$$h_L = 3,3945 \text{ m}$$

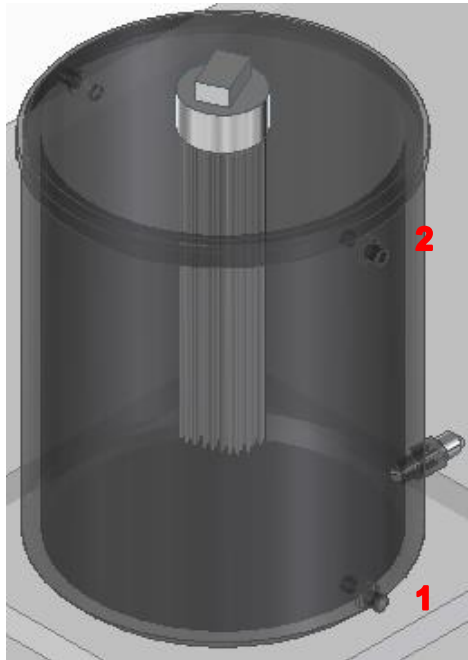
Las pérdidas totales de la sección C son:

$$h_{L,T} = 0,05845 \text{ m} + 0,04097 + 3,3945 \text{ m}$$

$$h_{L,T} = 3,4939 \text{ m}$$

3.3.3 Selección de la bomba hidráulica. Conociendo datos como caudal, velocidad del fluido, altura del agua en el tanque, pérdidas de energía en sistema hidráulico y estableciendo los puntos 1 y 2 en el tanque de almacenamiento como se muestra en la imagen (ver figura 20), se realiza el respectivo balance, empleando la ecuación general de la energía para seleccionar adecuadamente la bomba que impulsara el fluido en el sistema.

Figura 20. Tanque de almacenamiento



Fuente: elaboración propia

Ecuación 25. Ecuación general de la energía.

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + h_A - h_L - h_R = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2$$

Fuente: MOTT, Robert. Mecánica de fluidos. Sexta edición. México: Pearson Educación, 2006.

Donde

P_1 : Presión en el punto 1 = 10,5948 kPa

γ : Peso específico = 9,81 $\frac{kN}{m^3}$

V_1 : Velocidad en el punto 1 = 0,5960 $\frac{m}{s}$

g : Gravedad = 9,81 $\frac{m}{s^2}$

Z_1 : Altura en el punto 1 = 0 m

h_A : Energía agregada al fluido

h_L : Pérdidas de energía = 3,75844 m

h_R : Energía removida en el fluido

P_2 : Presión en el punto 2 = 0 kPa

V_2 : Velocidad en el punto 2 = $0,5960 \frac{m}{s}$

Z_2 : Altura en el punto 2 = 1,08 m

Reemplazando en la ecuación anterior se procede a calcular h_A

$$\begin{aligned} \frac{10,5948 \text{ kPa}}{9,81 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}} + \frac{\left(0,5960 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 \left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)} + 0_m + h_A - 3,75844 \text{ m} - 0 \text{ m} \\ = 0 + \frac{\left(0,5960 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 \left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)} + 1,08_m \\ h_A = 3,76 \text{ m} \end{aligned}$$

Posteriormente, se utilizó el catálogo comercial de la empresa EBARA Bombas para la selección de la bomba adecuada para el proyecto. Teniendo en cuenta aspectos como la temperatura máxima del fluido que maneja la bomba, esto es, igual o mayor a 50 °C, un caudal de 28,3134 L/min y la altura manométrica de 3,76 m.

De esta manera se seleccionó una electrobomba centrífuga serie 3M/3LM con un caudal de 50 L/min y una altura manométrica total de 5,6 m como se muestra en la siguiente tabla (ver la tabla 32).

Tabla 32. Catálogo técnico EBARA.

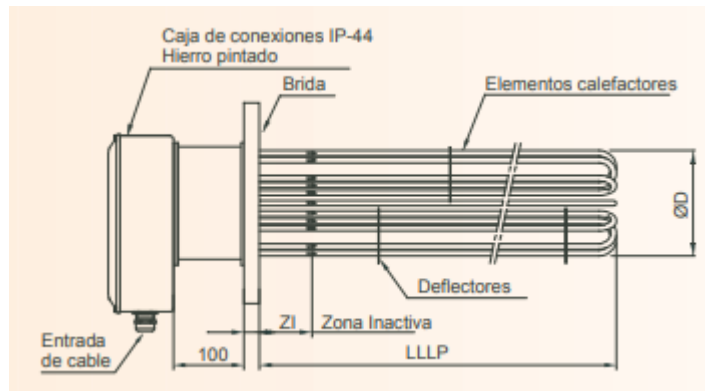
Tabla de características a 1.450 r.p.m - Modelos 3M4/3LM4 - 3S4/3LS4 - 3P4/3LP4																	4 Polos			
Modelo	kW	CV	Q=Caudal																	
			l/min	50	100	160	200	300	350	400	500	600	800	950	1000	1050	1100	1200	1300	1400
			m³/h	3	6	9,6	12	18	21	24	30	36	48	57	60	63	66	72	78	84
H=Altura manométrica total (m)																				
32-125/0.25	0,25	0,33	5,6	4,9	3,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32-160/0.37R	0,37	0,5	7,2	6,3	4,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32-160/0.37	0,37	0,5	8,7	8	6,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32-200/0.55R	0,55	0,75	10,5	9,3	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32-200/0.55	0,55	0,75	12	11	9,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32-200/0.75	0,75	1	17,3	16,5	14,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40-125/0.37R	0,37	0,5	-	4,5	4	3,6	2,3	1,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40-125/0.37	0,37	0,5	-	6,2	5,7	5,2	3,8	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40-160/0.55R	0,55	0,75	-	7,2	6,7	6,3	5	4,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40-160/0.55	0,55	0,75	-	8,5	7,9	7,5	6,2	5,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40-200/1.1R	1,1	1,5	-	11	10,5	10,1	9	8,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40-200/1.1	1,1	1,5	-	12,7	12,3	11,9	10,4	9,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40-200/1.5	1,5	2	-	17,8	17,4	16,9	15,3	14,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50-125/0.55R	0,55	0,75	-	-	-	4,9	4,4	4,2	3,8	3	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50-125/0.55	0,55	0,75	-	-	-	5,8	5,4	5,2	4,9	4,1	3,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50-160/1.1R	1,1	1,5	-	-	-	7,7	7,2	6,9	6,5	5,6	4,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50-160/1.1	1,1	1,5	-	-	-	9	8,5	8,2	7,8	6,9	5,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50-200/1.5R	1,5	2	-	-	-	12,1	11,5	11,1	10,6	9,5	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50-200/1.5	1,5	2	-	-	-	13	12,3	11,9	11,5	10,5	9,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50-200/2.2	2,2	3	-	-	-	17,7	17,2	16,8	16,4	15,4	14	-	-	-	-	-	-	-	-	-
65-125/0.55	0,55	0,75	-	-	-	-	4,8	4,6	4,4	4	3,5	2,3	1,4	-	-	-	-	-	-	-
65-125/0.75	0,75	1	-	-	-	-	6	5,8	5,7	5,2	4,6	3,5	2,5	2,2	-	-	-	-	-	-
65-125/1.1	1,1	1,5	-	-	-	-	7,2	7	5,8	6,3	5,8	4,5	3,5	3,2	2,8	-	-	-	-	-
65-160/1.1	1,1	1,5	-	-	-	-	-	8,1	8	7,4	7	5,7	4,6	4,2	3,8	-	-	-	-	-
65-160/1.5	1,5	2	-	-	-	-	-	9,2	9	8,5	8	6,7	5,7	5,3	4,9	4,5	-	-	-	-
65-160/2.2	2,2	3	-	-	-	-	-	11,3	11,1	10,6	10	8,8	7,6	7,2	6,8	6,4	5,5	-	-	-
65-200/2.2R	2,2	3	-	-	-	-	-	12,4	12,2	11,6	11	9,3	7,8	7,3	6,8	-	-	-	-	-
65-200/2.2	2,2	3	-	-	-	-	-	13,9	13,7	13	12,4	10,8	9,3	8,8	8,3	7,8	-	-	-	-
65-200/3.0	3	4	-	-	-	-	-	15,8	15,6	15	14,5	12,9	11,6	11,1	10,6	10,1	9	-	-	-
65-250/4.0	4	5,5	-	-	-	-	-	-	-	18,1	17,6	16,1	14,7	14,2	13,7	13	11,6	9,8	-	-
65-250/5.5	5,5	7,5	-	-	-	-	-	-	-	21,2	20,7	19,6	18,4	17,9	17,5	17	15,8	14,4	12,8	-

Fuente: EBARA. Tarifa catálogo [en línea]. s.f. Disponible en <http://www.ebara.es/catalogos-tecnicos/>

3.4 DISEÑO DETALLADO DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO DEL AGUA

3.4.1 Selección de la resistencia eléctrica. Se requiere emplear una resistencia eléctrica con una potencia de 45 kW, con el fin de aumentar la temperatura del agua de 20 °C a 50 °C, y reducir el consumo de energía en el sistema, así como el tiempo de calentamiento del agua en el tanque.

Figura 21. Resistencias para inmersión, accesorios y calentadores de bidón



Fuente: BROTOTERMIC. Resistencias eléctricas calefactores. [En línea]. [s.f.]. Disponible en: <http://www.brototermic.com/docs/catalogo-resistencias-calefactoras.pdf>

Tabla 33. Modelos normalizados GCB-A, gama para agua. Temperatura máxima de trabajo: 150 °C

Brida DN	ØD en mm	Nº varillas. (Tubo AISI 316L Ø10 mm)								Longitud Llano Platina (LLLP en mm)						
		6	9	12	15	18	21	24	27	30	600	800	1000	1250	1500	1750
200	100	X									15 kW	21 kW	27 kW	33,3 kW	42 kW	50 kW
	150		X								22,5 kW	31,5 kW	40,5 kW	50 kW	63 kW	75 kW
					X						30 kW	42 kW	54 kW	66,7 kW	84 kW	100 kW
						X					37,5 kW	52,5 kW	67,5 kW	83,3 kW	105 kW	125 kW
							X				45 kW	63 kW	81 kW	100 kW	126 kW	150 kW
								X			52,5 kW	73,5 kW	94,5 kW	116,7 kW	147 kW	175 kW
250								X			60 kW	84 kW	108 kW	133,3 kW	168 kW	200 kW
									X		67,5 kW	94,5 kW	121,5 kW	150 kW	189 kW	225 kW
										X	75 kW	105 kW	135 kW	166,7 kW	210 kW	250 kW

Fuente: BROTOTERMIC. Resistencias eléctricas calefactores. [En línea]. [s.f.]. Disponible en: <http://www.brototermic.com/docs/catalogo-resistencias-calefactoras.pdf>

Para calcular el tiempo que tarda la resistencia de 45 kW de potencia, y para llevar la temperatura del agua de 20 °C a 50 °C en un tanque de 500 L, se procedió a realizar el siguiente cálculo.

Ecuación 26. Ecuación de la masa del agua.

$$m = V * \rho$$

Fuente: elaboración propia con base en ÇENGEL, Yunus y BOLES, Michael. Termodinámica. Séptima edición. México: Mc-Graw Hill, 2011.

Donde

m: Masa del agua en kg

ρ: Densidad del agua = $1000 \frac{kg}{m^3}$

V: Volumen del recipiente = 500 L = 0,5 m³

Reemplazando en la ecuación anterior se obtiene:

$$m = 1000 \frac{kg}{m^3} * 0,5 m^3$$

$$m = 500 kg$$

Conociendo el valor de la masa se procede a calcular la cantidad neta de transferencia de calor para este caso.

Ecuación 27. Ecuación del Calor transferido por la resistencia eléctrica.

$$Q = m * C_p * (T_2 - T_1)$$

Fuente: elaboración propia con base en ÇENGEL, Yunus y BOLES, Michael. Termodinámica. Séptima edición. México: Mc-Graw Hill, 2011.

Donde

Q : Calor transferido en kJ

m : Masa del agua = 500 kg

$$C_p = \text{Calor específico del agua} = 4180 \frac{J}{kg * K}$$

T_1 : Temperatura inicial del agua = 20 °C

T_2 : Temperatura final del agua = 50 °C

Reemplazando los datos en la ecuación anterior, se obtuvo el calor transferido por la resistencia hacia el agua.

$$Q = 500 \text{ kg} * 4180 \frac{J}{kg * K} * (50 \text{ °C} - 20 \text{ °C})$$

$$Q = 62700000 \text{ J}$$

Conociendo el calor transferido, se calculó el tiempo que tarda esta resistencia en llevar la temperatura de 20 °C a 50 °C.

Ecuación 28. Ecuación del tiempo de calentamiento.

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

Fuente: elaboración propia con base en ÇENGEL, Yunus y BOLES, Michael. Termodinámica. Séptima edición. México: Mc-Graw Hill, 2011.

Donde

P : Potencia de la resistencia = 45 kW = 45000 W

Q : Calor transferido = 62700000 J

t : Tiempo que tarda la resistencia en calentar el agua.

Reemplazando en la ecuación se obtiene

$$t = \frac{62700000 \text{ J}}{45000 \text{ W}}$$

$$t = 1393,33 \text{ segundos}$$

$$t = 23,3 \text{ min}$$

Con el procedimiento anterior se concluyó que, para llevar la temperatura en el tanque de almacenamiento de agua de 20 °C a 50°C y con una resistencia de 45 Kw de potencia, se necesita un tiempo de 23,3 minutos.

3.5 EFICIENCIA TOTAL EN EL SISTEMA

Para el cálculo respectivo de la eficiencia total del sistema de evaporación de refrigerante a presión y temperatura controlada para la alimentación de turbinas de generación eléctrica se deben tener en cuenta datos como el calor agregado al sistema y el calor liberado en el sistema, es decir:

Ecuación 29. Ecuación de eficiencia térmica.

$$\eta_{ter} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

Fuente: ÇENGEL, Yunus y BOLES, Michael. Termodinámica. Séptima edición. México: Mc-Graw Hill, 2011.

Donde:

η_{ter} = Eficiencia total del sistema

Q_H : Calor agregado al sistema

Q_L : Calor liberado en el sistema

El calor total agregado al sistema es igual a:

Ecuación 30. Ecuación del calor agregado al sistema.

$$Q_H = \dot{Q}_R + \dot{Q}_C + \dot{Q}_{Evp}$$

Fuente: elaboración propia con base en ÇENGEL, Yunus y BOLES, Michael. Termodinámica. Séptima edición. México: Mc-Graw Hill, 2011.

Donde

\dot{Q}_R : Calor en la resistencia eléctrica = 45 kW

\dot{Q}_C : Calor en el compresor = 10,4 kW

\dot{Q}_{Evp} : Calor en el evaporador = 62,3 kW

Reemplazando en la ecuación anterior

$$Q_H = 45 \text{ kW} + 10,4 \text{ kW} + 62,3 \text{ kW}$$

$$Q_H = 117,7 \text{ kW}$$

Para calcular el calor liberado en el sistema se debe sumar el calor de los equipos que liberan calor en el sistema, es decir:

Ecuación 31. Ecuación del calor liberado en el sistema.

$$Q_L = \dot{Q}_{Vexp} + \dot{Q}_{cd} + \dot{Q}_{Tur}$$

Fuente: elaboración propia con base en ÇENGEL, Yunus y BOLES, Michael. Termodinámica. Séptima edición. México: Mc-Graw Hill, 2011.

Donde

\dot{Q}_{Vexp} : Calor en la válvula de expansión = 5,25 kW

\dot{Q}_T : Calor en la turbina

\dot{Q}_{cd} : Calor en el condensador = 8,007

Para el cálculo del calor en la turbina se realiza el balance térmico donde

Ecuación 32. Ecuación de calor para la turbina.

$$\dot{Q}_T = \dot{m}_R * h_3$$

Fuente: elaboración propia con base en ÇENGEL, Yunus y BOLES, Michael. Termodinámica. Séptima edición. México: Mc-Graw Hill, 2011.

Donde

$$\dot{m}_R: \text{Flujo másico del refrigerante} = 35 \frac{lb}{min} = 0,264596 \frac{kg}{s}$$

$$h_3: \text{Entalpía en la turbina} = 239,50 \frac{kJ}{kg}$$

Reemplazando en la ecuación anterior se obtiene

$$\dot{Q}_T = 0,264596 \frac{kg}{s} * 239,50 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{Q}_T = 63,3707 kW$$

Con este dato obtenido se puede calcular respectivamente el calor liberado en el sistema reemplazando en la ecuación:

$$Q_L = \dot{Q}_{Vexp} + \dot{Q}_{Cd} + \dot{Q}_{Tur}$$

$$Q_L = 5,25 kW + 8,007 kW + 63,3707 kW$$

$$Q_L = 76,6277 kW$$

Completando los datos de calor absorbido y calor liberado en el sistema se procede a calcular la eficiencia térmica total del sistema.

$$\eta_{ter} = 1 - \frac{76,6277 kW}{117,7 kW}$$

$$\eta_{ter} = 0,3489$$

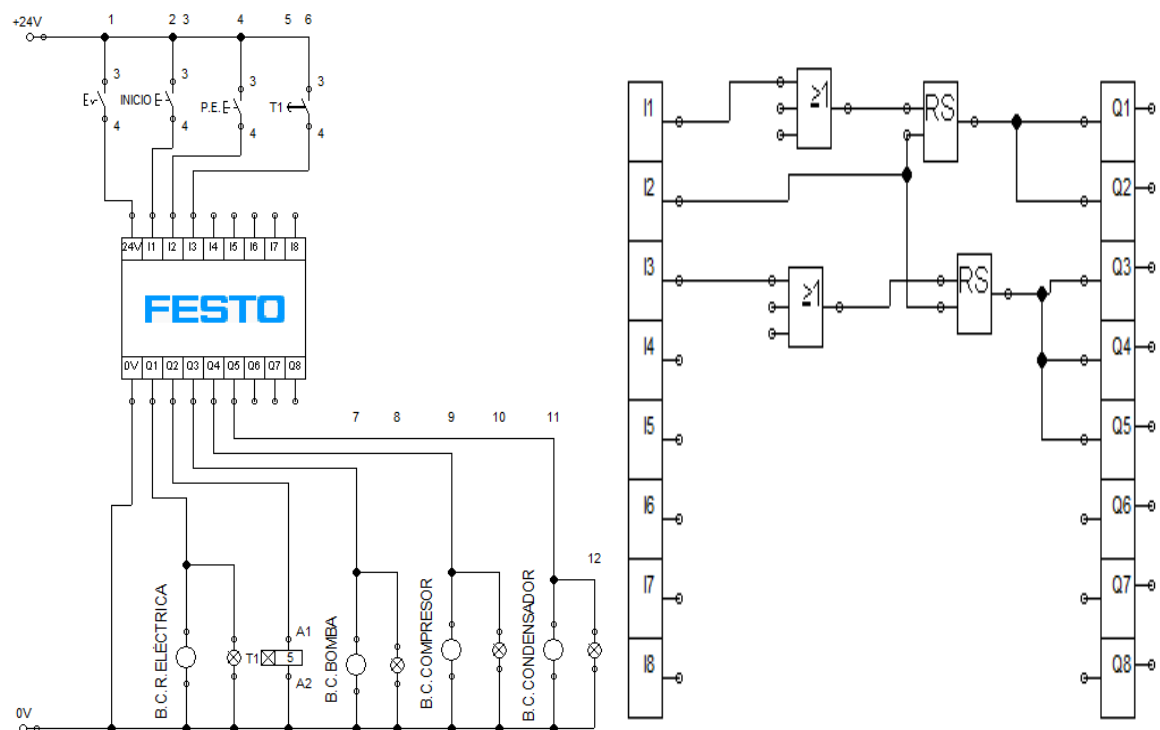
$$\eta_{ter} = 34,89 \%$$

Con el resultado obtenido anteriormente de la eficiencia térmica total en el sistema, se puede concluir que el sistema de evaporación de refrigerante a presión y temperatura controlada para la alimentación de turbinas de generación eléctrica teóricamente funcionaría correctamente y su valor de eficiencia se encuentra cerca al valor que manejan las centrales con turbinas a gas. Cabe resaltar que este valor puede cambiar si se realizara prácticamente, es decir, realizando su respectiva fabricación, funcionamiento, prueba y toma de datos para hacer un estudio práctico del sistema.

3.6 DISEÑO DETALLADO DEL SISTEMA DE CONTROL

Puesto que no hubo un requerimiento especial en cuanto al sistema de control del proyecto, se decidió, con plena libertad, diseñar una caja de control que está conformada por un switch, un pulsador y cuatro Leds que indican el correcto funcionamiento de la resistencia eléctrica, la bomba hidráulica, el compresor y los ventiladores del condensador. Esta caja de control también la conformará un PLC, un sensor de temperatura y un sensor de presión, los cuales se seleccionan a continuación.

Figura 22. Simulación de programación del PLC

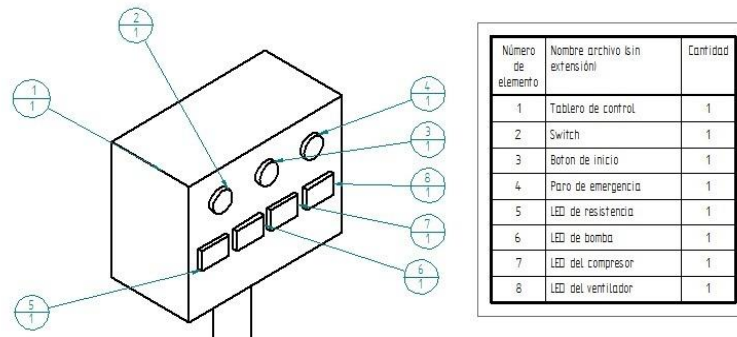


Fuente: elaboración propia.

Donde B.C. representa la bobina del colector de la resistencia eléctrica, bomba hidráulica, compresor y condensador.

Cabe resaltar que el esquema expuesto anteriormente de las conexiones de entrada y salida al PLC y su respectiva programación, es solo una simulación donde el tiempo uno “T1” simula el termostato, el cual, hasta alcanzar la temperatura deseada en el agua, activa las bobinas del colector de cada equipo.

Figura 23. Diseño del tablero de control



Fuente: elaboración propia

3.6.1 Selección del PLC

Imagen 12. PLC serie XC3 14E / 10S



Fuente: ELÉCTRICAS BOGOTÁ. PLC serie XC3 14E / 10S. [En línea]. [2010]. Disponible en: <http://www.electricasbogota.com/detalles/-plc/1630-68054>

Tabla 34. Datos técnicos del PLC

FICHA TÉCNICA	
Formato de Programa:	Ladder - Lista de instrucciones
Capacidad de programa:	8000 Pasos
Número de entradas:	14
Tipo de entrada:	Contacto libre de voltaje o NPN
Voltaje Señal de entrada:	24VDC +/- 10 %
Número de salidas:	10 x 0.5A DC
Tipo de salida:	Transistor NPN colector abierto
Máximos puntos de entrada y salida:	228 (7 módulos de expansión)
Bobinas Internas (M):	8,512
Tiempo de Scan:	0 - 99 mS
Reloj tiempo real:	Si
Puertos de comunicación:	COM 1: RS232
	COM2: RS-485
Alimentación:	20-30 VDC

Fuente: elaboración propia con base en ELÉCTRICAS BOGOTÁ. PLC serie XC3 14E / 10S. [En línea]. [2010]. Disponible en: <http://www.electricasbogota.com/detalles/-plc/1630-68054>

3.6.2 Selección del sensor de temperatura

Imagen 13. Termostato conexión a proceso 0 a +90 °C, 20A



Fuente: ELÉCTRICAS BOGOTÁ. Termostato conexión a proceso 0 a +90 °C, 20^a. [En línea]. [2010]. Disponible en: <http://www.electricasbogota.com/detalles/termostatos/1469-71091>

Tabla 35. Datos técnicos del termostato

FICHA TÉCNICA	
Rango:	0-90°C
Capacidad:	20A / 250V
Montaje:	Proceso 1/2" NPT
Long. Bulbo:	50mm
Diam. Bulbo:	3/8"

Fuente: ELÉCTRICAS BOGOTÁ. Termostato conexión a proceso 0 a +90 °C, 20^a. [En línea]. [2010]. Disponible en: <http://www.electricasbogota.com/detalles/termostatos/1469-71091>

3.6.3 Selección del sensor de presión

Imagen 14. Interruptor de presión para controlar Compresores 115/230V 50/60Hz



Fuente: ELÉCTRICAS BOGOTÁ. Interruptor de presión para controlar Compresores 115/230V 50/60Hz [En línea]. [2010]. Disponible en: <http://www.electricasbogota.com/detalles/presostatos/5470-92194>

Tabla 36. Datos técnicos del presostato.

FICHA TÉCNICA	
Alimentación:	115/230 VAC 50/60Hz
Corriente Nominal:	12A
Calibración de Fabrica:	80 - 115PSI
Presión Mínima:	20PSI
Presión Máxima:	175PSI
Conexión:	1/4" NPT Hembra
Base entrada:	Metálico de 1 vía
Dimensiones:	130 x 82 x 52mm

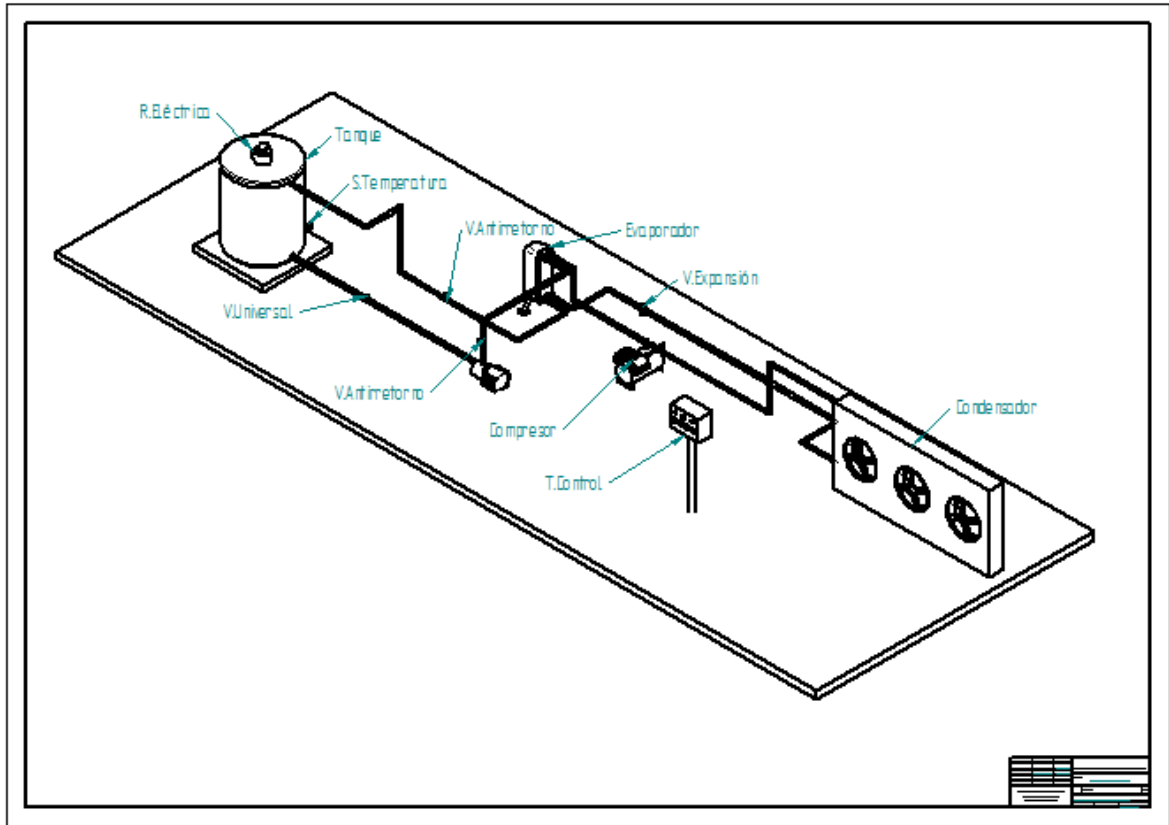
Fuente: elaboración propia con base en ELÉCTRICAS BOGOTÁ. Interruptor de presión para controlar Compresores 115/230V 50/60Hz [En línea]. [2010]. Disponible en: <http://www.electricasbogota.com/detalles/presostatos/5470-92194>

4. MANUALES

4.1 MANUAL DE INSTALACIÓN

En el presente manual se plantean las notas técnicas que se deben tener en cuenta al momento de ensamblar cada uno de los sistemas del proyecto. El buen funcionamiento de este dependerá de su correcta instalación. Por ello, antes de empezar se debe verificar el buen estado físico de cada uno de los componentes, que estén libres de óxido, aceites y/o grasas. Una vez verificado esto, se debe identificar cada uno de los componentes del sistema.

Figura 24. Plano Sistema de evaporación de refrigerante



Fuente: elaboración propia

Adicionalmente, resulta pertinente verificar los siguientes pasos propuestos para la correcta instalación del sistema:

Figura 25. Manual de instalación

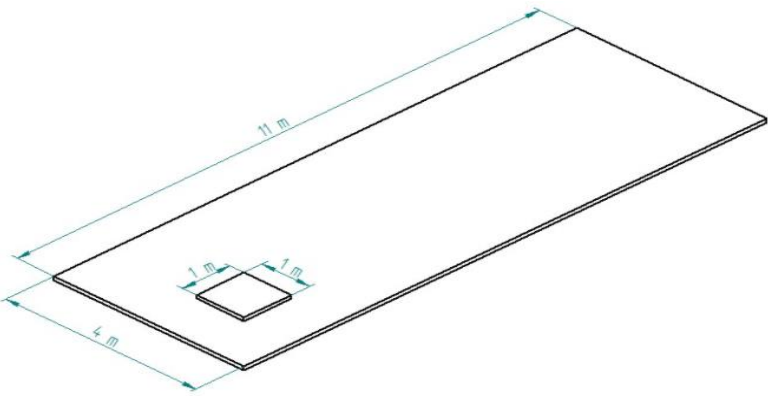
MANUAL DE INSTALACION																																																	
1	<p>Tenga en cuenta un área de 30 – 45 m² en donde quedará instalado el sistema.</p>  <p>El diagrama muestra un área rectangular con una longitud de 11 m y un ancho de 4 m. En el centro de esta área hay un espacio cuadrado de 1 m por 1 m, delimitado por líneas azules.</p>																																																
2	Asegúrese de tener una fuente de 220 V trifásica para la alimentación energética del sistema.																																																
3	Se recomienda tener una estructura con doble refuerzo superior e inferior, compuesto por una malla electro soldada de 30x30cm de varillas de 3/8" y con recubrimiento de 5cm.																																																
4	Verifique que cumpla con el listado de partes que se le da en el plano del sistema.																																																
LISTADO DE PARTES																																																	
	<table border="1"> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Tanque de almacenamiento</td> <td>500 L</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Bomba centrífuga</td> <td>50 L/min - 0,75 HP</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>Evaporador</td> <td>62,3 Kw</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>Compresor</td> <td>15 Kw</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>Condensador</td> <td>30 HP, Q=13000 CFM</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>Resistencia eléctrica</td> <td>45 Kw</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>Termostato</td> <td>1 Unidad</td> </tr> <tr> <td>8</td> <td>Presostato</td> <td>1 Unidad</td> </tr> <tr> <td>9</td> <td>Válvula universal</td> <td>1 Unidad</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>Válvula de expansión</td> <td>1 Unidad</td> </tr> <tr> <td>11</td> <td>Válvula de retención</td> <td>2 Unidades</td> </tr> <tr> <td>12</td> <td>Tubería PVC x 6m</td> <td>2 x 1 1/4"</td> </tr> <tr> <td>13</td> <td>Tubería Cobre x 6m</td> <td>2 x 1 1/4"</td> </tr> <tr> <td>14</td> <td>Codo PVC 90°</td> <td>7 x 1 1/4"</td> </tr> <tr> <td>15</td> <td>Codo en cobre 90°</td> <td>6 x 1 1/4"</td> </tr> <tr> <td>16</td> <td>Aislante térmico</td> <td>Armaflex XG Armacell</td> </tr> </tbody> </table>	1	Tanque de almacenamiento	500 L	2	Bomba centrífuga	50 L/min - 0,75 HP	3	Evaporador	62,3 Kw	4	Compresor	15 Kw	5	Condensador	30 HP, Q=13000 CFM	6	Resistencia eléctrica	45 Kw	7	Termostato	1 Unidad	8	Presostato	1 Unidad	9	Válvula universal	1 Unidad	10	Válvula de expansión	1 Unidad	11	Válvula de retención	2 Unidades	12	Tubería PVC x 6m	2 x 1 1/4"	13	Tubería Cobre x 6m	2 x 1 1/4"	14	Codo PVC 90°	7 x 1 1/4"	15	Codo en cobre 90°	6 x 1 1/4"	16	Aislante térmico	Armaflex XG Armacell
1	Tanque de almacenamiento	500 L																																															
2	Bomba centrífuga	50 L/min - 0,75 HP																																															
3	Evaporador	62,3 Kw																																															
4	Compresor	15 Kw																																															
5	Condensador	30 HP, Q=13000 CFM																																															
6	Resistencia eléctrica	45 Kw																																															
7	Termostato	1 Unidad																																															
8	Presostato	1 Unidad																																															
9	Válvula universal	1 Unidad																																															
10	Válvula de expansión	1 Unidad																																															
11	Válvula de retención	2 Unidades																																															
12	Tubería PVC x 6m	2 x 1 1/4"																																															
13	Tubería Cobre x 6m	2 x 1 1/4"																																															
14	Codo PVC 90°	7 x 1 1/4"																																															
15	Codo en cobre 90°	6 x 1 1/4"																																															
16	Aislante térmico	Armaflex XG Armacell																																															

Figura 25. (Continuación). Manual de instalación.

5	Utilice adaptadores de 2" para conectar la tubería de cobre con el ICP. Para la tubería de PVC utilice un adaptador de 2" para la entrada del ICP y otra de 1 1/2" para la salida.		
6	Recubra la tubería de cobre con cinta aislante térmica Armaflex XG Armacell de 50 mm de espesor para evitar pérdidas de calor.		
7	En la siguiente tabla se le especificarán las distancias a las que debe ser ubicado cada componente en un plano X,Z. Tome como guía el punto de partida (0,0,0) indicado en el plano.		
PLANO DE COORDENADAS PARA LA UBICACIÓN DE COMPONENTES DEL SISTEMA			
			
UBICACIÓN DE COMPONENTES POR COORDENADAS EN METROS			
UBICACIÓN DE COMPONENTES POR CORDENADAS (m)			
COMPONENTE	X	Y	Z
Tanque	1,5	1,5	0,06
Bomba	4,8	1,5	0
ICP	4,3	2,8	0
Condensador	9,7	2,8	0
Compresor	5,8	2,8	0
Tablero de control	7,6	1,4	1

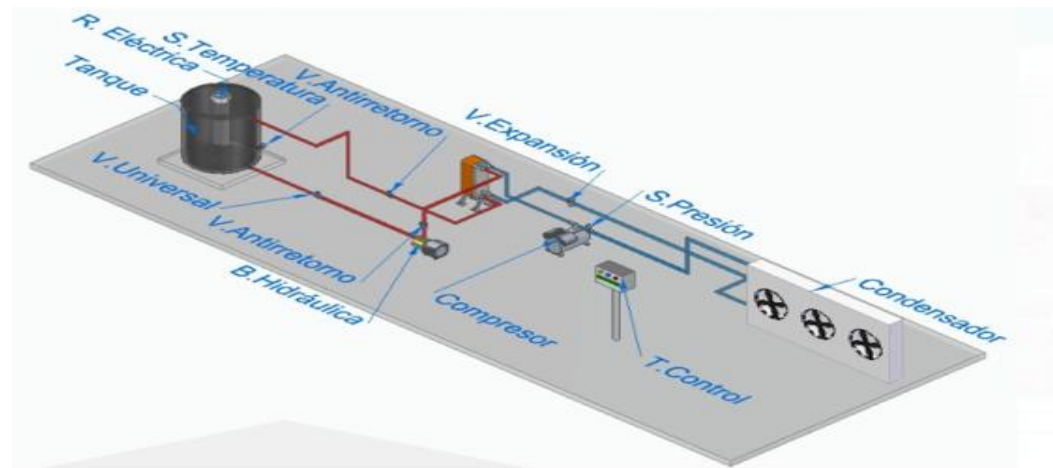
Figura 25. (Continuación). Manual de instalación.

8 Tenga en cuenta la tabla de circuitos. El sistema consta de dos circuitos: el circuito 1 del fluido caliente (agua) y el circuito 2 del fluido frío (refrigerante). Esta tabla divide cada circuito con su número de tramos y las respectivas distancias que hay entre cada componente.

El sistema con la tubería instalada debe quedarle de la siguiente manera:

TABLA DE CIRCUITOS					
CIRCUITO	TRAMO		DISTANCIA	COMPONENTES	TUBERÍA
Circuito 1 (Agua)	A	Tanque - Bomba	2,6 m	1 Válvula universal	PVC 1 1/4"
	B	Bomba - ICP	2,03 m	1 Válvula antiretorno 2 Codos 90°	PVC 1 1/4"
	C	ICP - Tanque	4,53 m	5 Codos 90° 1 Válvula antiretorno	PVC 1 1/4"
Circuito 2 (Refrigerante)	D	Condensador - ICP	5,19 m	4 Codos 1 Válvula de expansión	Cobre tipo L 1 1/4"
	E	ICP - Compresor	3,32 m	2 Codos 90° 1 Presostato	Cobre tipo L 1 1/4"

PLANO INSTALACION DE TUBERIA



Fuente: Elaboración propia.

9 Se recomienda cumplir con estas distancias ya que de esta manera fueron calculadas las pérdidas por tubería y accesorios.

10 Se recomienda dejar un espacio de 1 a 2 metros a la redonda de cada componente para sus respectivas intervenciones de mantenimiento.

11 Tome los manuales de instalación de fábrica para los respectivos montajes de cada componente.

Fuente: elaboración propia.

4.2 MANUAL DE OPERACIÓN

El sistema está diseñado para trabajar continuamente si se desea, sin embargo, se recomienda realizar un monitoreo de este para prevenir posibles fallas y prolongar su vida útil.

Figura 26. Descripción del procedimiento

MANUAL DE OPERACIÓN	
DESCRIPCIÓN DE FUNCIONAMIENTO	
1	El proceso inicia en el tanque de almacenamiento de agua la cual será calentada a través de una resistencia eléctrica instalada en el tanque.
2	Abra la válvula que está ubicada dentro del tramo del tanque de almacenamiento, hasta la bomba.
3	La bomba aumenta la presión del agua y la dirige hacia el ICP.
4	Al mismo tiempo empieza a fluir el refrigerante entre la tubería de cobre, previamente cargado en la instalación del sistema.
5	En el ICP ambos fluidos intercambian su calor, el sistema está diseñado para que el refrigerante alcance su temperatura de evaporación y salga del ICP en estado gaseoso. Aquí el agua cede su calor al refrigerante haciendo que este alcance su punto de ebullición y salga del ICP en estado gaseoso.
6	El agua sale del ICP y se redirige nuevamente hacia el tanque. Por esta tubería se encuentra una válvula anti retorno para evitar que el agua se devuelva al intercambiador en caso de rebosar el tanque de almacenamiento.
7	El refrigerante sale del ICP y pasa por un compresor para aquí aumentar su presión y que llegue a la turbina a la presión necesaria para su correcto funcionamiento.
8	El refrigerante al cumplir su función en la turbina, se dirige nuevamente hacia el condensador del sistema en donde vuelve a su estado líquido para iniciar nuevamente el ciclo.
PLANO CIRCUITO HIDRAULICO DEL SISTEMA DE EVAPORACIÓN DE REFRIGERANTE	

Fuente: elaboración propia.

Figura 27. Modo de operación

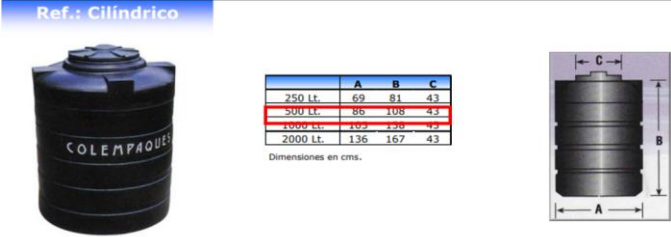
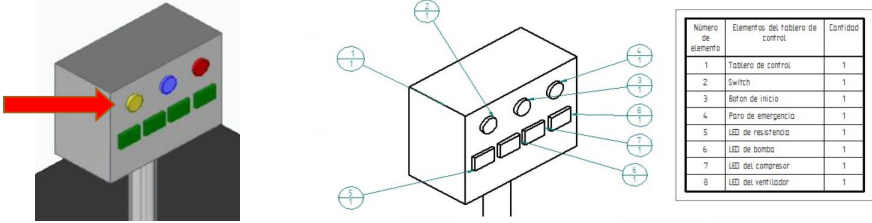
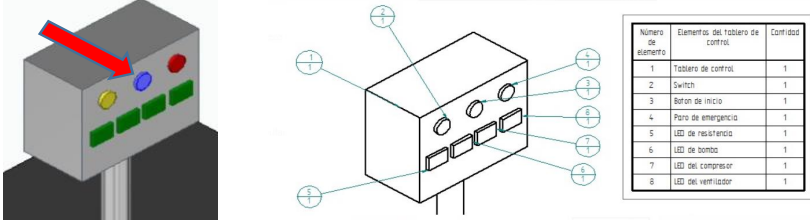
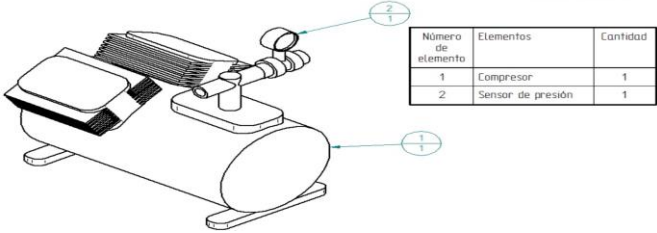
MODO DE OPERACIÓN																												
1	<p>Verifique que el tanque de almacenamiento se encuentre lleno de agua a una altura mínima de 90cm.</p>																											
	<p>Ref.: Cilíndrico</p>  <table border="1" data-bbox="776 474 964 548"> <thead> <tr> <th></th> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>250 Lt.</td> <td>69</td> <td>81</td> <td>43</td> </tr> <tr> <td>500 Lt.</td> <td>86</td> <td>108</td> <td>43</td> </tr> <tr> <td>1000 Lt.</td> <td>102</td> <td>136</td> <td>43</td> </tr> <tr> <td>2000 Lt.</td> <td>136</td> <td>167</td> <td>43</td> </tr> </tbody> </table> <p>Dimensiones en cms.</p> <p>Fuente: Tanques plásticos. Col empaques.</p>		A	B	C	250 Lt.	69	81	43	500 Lt.	86	108	43	1000 Lt.	102	136	43	2000 Lt.	136	167	43							
	A	B	C																									
250 Lt.	69	81	43																									
500 Lt.	86	108	43																									
1000 Lt.	102	136	43																									
2000 Lt.	136	167	43																									
2	<p>Verifique que todas las válvulas del sistema estén abiertas.</p>																											
3	<p>Suministre energía al sistema activando el switch del sistema de control.</p>																											
	 <table border="1" data-bbox="1073 800 1269 989"> <thead> <tr> <th>Número de elemento</th> <th>Elemento del tablero de control</th> <th>Cantidad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Tablero de control</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Switch</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>Botón de inicio</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>Paro de emergencia</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>LED de resistencia</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>LED de bomba</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>LED del compresor</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>8</td> <td>LED del ventilador</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	Número de elemento	Elemento del tablero de control	Cantidad	1	Tablero de control	1	2	Switch	1	3	Botón de inicio	1	4	Paro de emergencia	1	5	LED de resistencia	1	6	LED de bomba	1	7	LED del compresor	1	8	LED del ventilador	1
Número de elemento	Elemento del tablero de control	Cantidad																										
1	Tablero de control	1																										
2	Switch	1																										
3	Botón de inicio	1																										
4	Paro de emergencia	1																										
5	LED de resistencia	1																										
6	LED de bomba	1																										
7	LED del compresor	1																										
8	LED del ventilador	1																										
4	<p>Inicie el proceso pulsando el botón azul de inicio.</p>																											
	 <table border="1" data-bbox="1081 1087 1269 1276"> <thead> <tr> <th>Número de elemento</th> <th>Elemento del tablero de control</th> <th>Cantidad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Tablero de control</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Switch</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>Botón de inicio</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>Paro de emergencia</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>LED de resistencia</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>LED de bomba</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>LED del compresor</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>8</td> <td>LED del ventilador</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	Número de elemento	Elemento del tablero de control	Cantidad	1	Tablero de control	1	2	Switch	1	3	Botón de inicio	1	4	Paro de emergencia	1	5	LED de resistencia	1	6	LED de bomba	1	7	LED del compresor	1	8	LED del ventilador	1
Número de elemento	Elemento del tablero de control	Cantidad																										
1	Tablero de control	1																										
2	Switch	1																										
3	Botón de inicio	1																										
4	Paro de emergencia	1																										
5	LED de resistencia	1																										
6	LED de bomba	1																										
7	LED del compresor	1																										
8	LED del ventilador	1																										
5	<p>Una vez iniciado el proceso, la resistencia eléctrica se activará durante 15 a 20 minutos hasta calentar el agua a la temperatura mínima requerida por el sistema, 30°C.</p>																											
6	<p>Una vez alcanzado esta temperatura mínima, el sistema iniciará automáticamente el funcionamiento de todos los equipos a proceder.</p>																											
7	<p>Verifique que el refrigerante salga del compresor en un rango de presión entre 0,78 y 0,82 Mpa.</p>																											
	 <table border="1" data-bbox="902 1591 1149 1675"> <thead> <tr> <th>Número de elemento</th> <th>Elementos</th> <th>Cantidad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Compresor</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Sensor de presión</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	Número de elemento	Elementos	Cantidad	1	Compresor	1	2	Sensor de presión	1																		
Número de elemento	Elementos	Cantidad																										
1	Compresor	1																										
2	Sensor de presión	1																										

Figura 27. (Continuación). Modo de operación.

8 En caso de emergencia, pulse el botón rojo para detener el sistema.

Número de elemento	Elementos del tablero de control	Cantidad
1	Tablero de control	1
2	Switch	1
3	Botón de inicio	1
4	Paro de emergencia	1
5	LED de resistencia	1
6	LED de bomba	1
7	LED del compresor	1
8	LED del ventilador	1

9 Los cuatro led de la parte inferior le indicaran el inicio de cada componente del sistema según corresponda.

Número de elemento	Elementos del tablero de control	Cantidad
1	Tablero de control	1
2	Switch	1
3	Botón de inicio	1
4	Paro de emergencia	1
5	LED de resistencia	1
6	LED de bomba	1
7	LED del compresor	1
8	LED del ventilador	1

Fuente: elaboración propia

4.3 MANUAL DE MANTENIMIENTO

A continuación, se hace una descripción del sistema detallando sus subsistemas y cada una de las partes que lo componen. Adicional a ello, se exponen sus especificaciones técnicas, la ficha técnica del sistema y, finalmente, la tabla de fallas para su debido mantenimiento.

4.3.1 Ficha técnica

Figura 28. Ficha técnica

SISTEMA DE EVAPORACION DE REFRIGERANTE

Este es un sistema de evaporación de refrigerante que será utilizado para la alimentación de una turbina de generación eléctrica a una presión y temperatura controlada.

NOMBRE TECNICO

Sistema de evaporación de Refrigerante.

PROCEDENCIA

Bogotá D.C., Colombia

Especificaciones técnicas

Área: 30 - 45 m²

Tanque de almacenamiento: 500L

Fluidos de operación: Agua residual y Refrigerante 134-a.

Sistema de evaporación de refrigerante

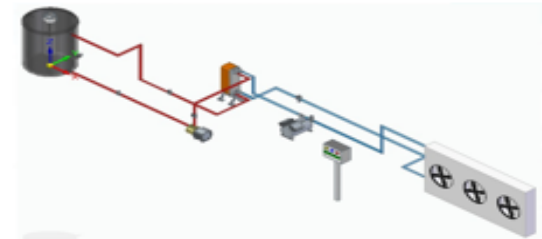
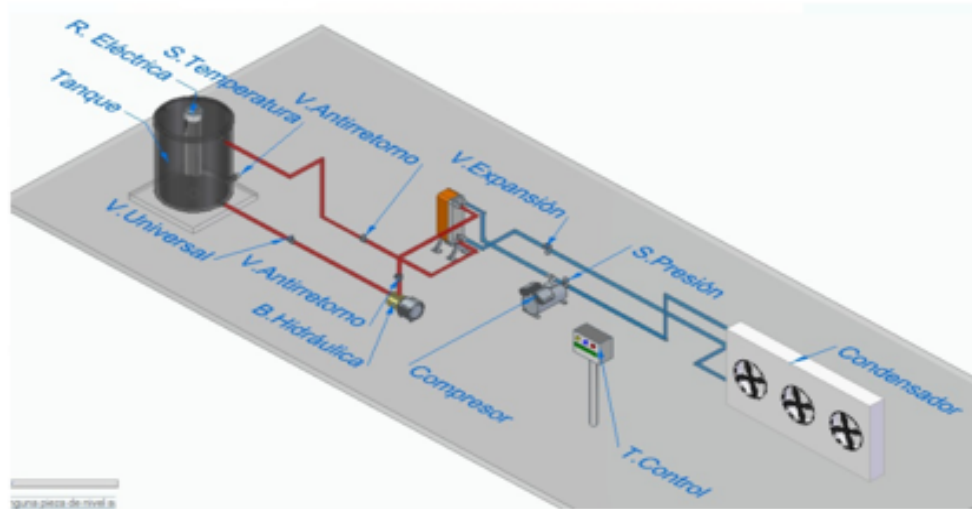


Figura 28. (Continuación).





LISTADO DE PARTES


1	Tanque de almacenamiento	500 L
2	Bomba centrífuga	50 L/min - 0,75 HP
3	Evaporador	62,3 Kw
4	Compresor	15 Kw
5	Condensador	30 HP, Q=13000 CFM
6	Resistencia eléctrica	45 Kw
7	Termostato	1 Unidad
8	Presostato	1 Unidad
9	Válvula universal	1 Unidad
10	Válvula de expansión	1 Unidad
11	Válvula de retención	2 Unidades
12	Tubería PVC x 6m	2 x 1 1/4"
13	Tubería Cobre x 6m	2 x 1 1/4"
14	Codo PVC 90°	7 x 1 1/4"
15	Codo en cobre 90°	6 x 1 1/4"
16	Aislante térmico	Armaflex XG Armacell

Figura 28. (Continuación).

PROVEEDORES NACIONALES


 **HOMECENTER**
SOOMAC corona Línea Nacional: 01 8000 12 7373

 **INDUSTRIAL CALIMA** Contacto:
ventas@industrialcalima.com
+ 57 2 381 32 55
+ 316 408 6118


 **EQUI SOL S.A.S.**
Equipos y Soluciones | **Teléfono**
(574) 444 6169 **Email**
mercadeo@equisol.com.co

Dirección
Diagonal 43 No. 28 – 41. Bodega 104.
Unidad Industrial Marandúa – Itagüí

PROVEEDORES INTERNACIONALES

 **HRS**
heat exchangers HRS Heat Exchangers, SLU
Poligono Industrial San Martin
C/Castillo de la Concepción, 14
30564 Lorquí
Murcia
España
Email: info@hrs-he.com
Tel: +34 968 676 157
Fax: +34 968 676 166

Chile
Lorenzo Huambachano - lhuam
lorenzo.huambachano@froztec.com
Av. Duñe Almeida 5595, Oficina 305,
Región Metropolitana, Santiago de Chile.
Tel: (56) 22 985 3243
Cel: (56) 99 532 3195

 **froztec**

LISTADO DE REPUESTOS

- Placas
- Empaques
- Tubería aleteada
- Resistencia eléctrica
- Bomba
- Tanque
- Compresor

Fuente: elaboración propia

4.3.2 Manual de mantenimiento. Teniendo en cuenta los sistemas, subsistemas y componentes, se desarrolló el siguiente manual de mantenimiento:

Cuadro 3. Manual de mantenimiento

Equipo	Sistema	Subsistema	Componente	Inspección	Análisis	Falla	Periodicidad
SISTEMA DE EVaporACION DE REFRIGERANTE	Hidráulico	N/A	Tanque	1. Revise el buen estado de la pintura de ecubrimiento del tanque.	Visual	Corrosión Desgaste	Mensual
				2. Revisar que no exista corrosión en las paredes externas e internas del tanque.	Visual	Corrosión	Mensual
				3. Revisar que no hayan golpes o lesiones en las paredes del tanque, así como fisuras o fugas de escape.	Visual	Grietas Quiebre del tanque Fugas	Mensual
				4. Revisar que no haya suciedades en el tanque.	Visual - Limpieza	Taponamiento a la salida del	Diario
			Tubería	1. Revisar que no haya oxidación	Ultrasonido	Corrosión	2 meses
				2. Revisar que no tenga escapes o fugas.	Resonancia y vibración producida	Fugas	Semanal
			Bomba	1. Revisar el estado de los sellos mecánicos	Visual - limpieza	Fugas	Semanal
				2. Revisar que no haya estancamientos en la entrada y salida de la bomba.	Revisión de presión a la salida de la	Daño de la bomba	Diario
				3. Revisar que no haya corrosión en la bomba.	Visual-Ultrasonido	Corrosión	Mensual
				4. Revisión que no haya ruido o vibraciones anormales.	Visual - auditivo	Sobrecarga	Semanal
			Válvulas	1. Revisar que no haya corrosión.	Visual - Ultrasonido	Corrosión	Mensual
				2. Revisar el buen estado de sus empaques.	Visual - limpieza	Fugas	Semanal
				3. Falla en la transmisión de señal.	Visual	Error en la transmisión de señal	Semanal

Cuadro 4. (Continuación).

SISTEMA DE EVaporACION DE REFRIGERANTE	Térmico	Intercambiador de calor	Placas	1. Verifique que no exista corrosión en las placas.	Visual - Ultrasonido	Corrosión	Mensual
				2. Verificar que las placas no tengan deformaciones ni perforaciones.	Visual - Ultrasonido	Fugas y sobrecalentamiento	Mensual
				3. Verificar que no exista suciedad en las conexiones.	Limpieza	Obstrucción en las salidas del ICP	2 semanas
			Juntas	1. Verifique que las juntas no estén vencidas.	Visual	Fugas	2 semanas
				2. Verifique que no hayan fugas a través de ellas.	Ultrasonido	Escape de fluidos	3 semanas
				3. Verifique que no hayan zonas reventadas en las juntas.	Visual	Fugas	4 semanas
			Barra de soporte	1. Revise que este bien anclada.	Visual	Desajuste	3 semanas
				2. Revise que soporte correctamente las placas.	Visual	Sobrecarga	3 semanas
				3. Revise que no haya corrosión.	Visual - Ultrasonido	Corrosión	Mensual
				4. Revise que no tenga golpes ni deformaciones.	Visual	Deterioro del mismo	Mensual
			Pernos para compresión	1. Verifique que no haya corrosión en el cuerpo del elemento.	Visual - Ultrasonido	Corrosión	Mensual
				2. Revise que no hayan golpes o deformaciones en su estructura.	Visual	Sobrecarga y deterioro del mismo	2 semanas
				3. Verifique el buen ajuste entre la unión de sus elementos.	Ajuste	Fugas	Semanal

Cuadro 5. (Continuación).

SISTEMA DE EVaporACION DE REFRIGERANTE	Refrigeración	N/A	Compresor	1. Verifique que no haya humedad.	Visual	Corrosión	2 semanas
				2. Verifique que no haya suciedad en el sistema.	Limpieza	Falla en componentes eléctricos - obstrucción	2 semanas
				3. Verifique que su temperatura no sea excesiva.	Toma de temperatura con un termómetro industrial.	Sobrecalentamiento	Diario
				4. Verifique que el compresor no se encuentre quemado.	Visual	Sobrecalentamiento	Diario
				5. Verifique que el cuerpo este bien lubricado.	Lubricación	Sobrecalentamiento Desgaste	Mensual
			Evaporador	1. Revise que no haya corrosión en el sistema.	Ultrasonido	Corrosión	Mensual
				2. Revise que no hayan fugas o golpes.	Visual - Limpieza	Fugas	Mensual
			Condensador	1. Compruebe que no hayan fugas en su estructura.	Visual - Ultrasonido	Fugas y escapes	Mensual
				2. Verifique que no esté a una temperatura muy elevada.	Termografía	Sobrecalentamiento	Diario
				3. Revise que no tenga corrosión.	Visual - Ultrasonido	Corrosión	Mensual
				4. Revise que no este taponado.	Ultrasonido	Obstrucción del componente	2 semanas

Cuadro 6. (Continuación).

SISTEMA DE EVaporACION DE REFRIGERANTE	Calentamiento	N/A	Resistencia eléctrica	1. Compruebe la eficiencia de la resistencia al calentar el agua a la temperatura deseada.	Toma de temperatura directamente al agua en el tanque de almacenamiento.	El no cumplimiento de los parámetros de inicio del sistema de evaporación de refrigerante.	Diario
				2. Revise el buen estado de los cables de la resistencia.	Visual	Corto eléctrico	Mensual
				3. Verifique que no haya corrosión en su estructura.	Limpieza	Corrosión	Mensual
				4. Verifique que no hayan fugas entre el tanque y su adaptación para la ubicación de la resistencia.	Visual - Limpieza	Fugas	Semanal
	Control	N/A	Tablero de control	1. Verifique que el tablero este libre de polvo y otros signos de suciedad.	Visual - Limpieza Análisis termográfico	Corrosión Cortos eléctricos Sobrecalentamiento Daño del sistema	Semanal
				2. Verificación del rotulado e identificación de cada tablero eléctrico.			
				3. Verificación de capacidad de los térmicos y cables correspondan.			
			4. Limpieza de los componentes eléctricos del tablero.				
			5. Limpieza de las barras de alimentación con solvente dieléctrico de cada tablero eléctrico.				
			6. Análisis termográfico de los tableros.				
			7. Ajuste de contactos eléctricos.				
			8. Mediciones de parámetros eléctricos en cada tablero eléctrico.				

Fuente: elaboración propia.

4.3.3 Tabla de fallas

Cuadro 7. Tabla de fallas

Falla	Característica	Metodología	Recurso a emplear
Sobre Calentamiento	Aumento en el consumo de los componentes eléctricos de la máquina.	Desde el tablero de control desenergice todo el sistema y verifique que los componentes del sistema no estén averiados o tengan obstrucciones que le hagan aumentar su consumo energético.	Personal de mantenimiento, manual de mantenimiento del fabricante del componente averiado.
	Aumento excesivo en la temperatura del agua del tanque hasta su rápida evaporación.	Desocupe el tanque de almacenamiento de agua y verifique que la resistencia eléctrica no esté quemada y funcione correctamente. También verifique que el cableado de la resistencia no esté quemado o con mordeduras. Cambie la resistencia y/o el cableado de estar dañados.	Ficha técnica. Distribuidores para el repuesto de la resistencia eléctrica. Personal eléctrico.
Daño en empaques	Falla hermética en placas, bombas y uniones, pueden verse fugas o escapes.	Desde el tablero de control desenergice el sistema y ubique los empaques dañados que presenten desgaste para luego cambiarlos.	Personal de mantenimiento Ficha técnica Distribuidores para el repuesto de empaques.
Corto Circuito	Aumento brusco de intensidad en la corriente eléctrica por cables mal empalmados, sueltos o averiados.	Desenergizar el sistema y realizar el desmonte del cableado para verificar uniones, empalmes y estado del cableado. De ser necesario, reponga el cableado.	Personal de mantenimiento y personal de daños eléctricos.
	Daño en la resistencia eléctrica por avería y/o contacto con algún fluido.	Ubique el lugar donde se presentó el corto y reponga el cableado o la resistencia afectada.	Ficha técnica Distribuidores para el repuesto de la resistencia eléctrica y cableado. Personal de mantenimiento eléctrico.
Fugas	Escape de fluidos en tanque, tuberías o demás componentes. Baja en el rendimiento de evaporación del refrigerante. Oxidación.	Accione el sistema y verifique el lugar de la fuga, repare o cambie la parte averiada de ser necesario.	Personal de mantenimiento, manual y ficha técnica del sistema con distribuidores para el cambio del componente dañado.
Taponamiento	Obstrucción dentro del sistema por acumulo de suciedad o agentes ajenos a los fluidos.	Realice una revisión periódica de limpieza dentro del sistema para evacuar constantemente suciedades. Por ultrasonido ubique el posible estancamiento, desenergice el sistema y desmonte la parte en donde este la obstrucción para poder limpiar la zona.	Personal de limpieza y mantenimiento del sistema, tabla de inspecciones para la verificación de su periodicidad.
Desajuste	Con el tiempo la estructura y componentes del sistema pueden desajustarse.	Apriete constantemente los pernos y tornillos de la estructura así como verifique el empalme de las tuberías y accesorios.	Personal de mantenimiento y herramientas de ajuste como un torquímetro

Fuente: elaboración propia

5. EVALUACIÓN FINANCIERA

5.1 COSTOS DEL SISTEMA

Con respecto al análisis de costos, se tuvieron en cuenta únicamente los costos de los componentes del sistema y sus costos de ingeniería. Para dicho objetivo, se compararon los costos de implementación de un ciclo Rankine en relación con la implementación de un ciclo orgánico Rankine.

Tabla 37. Costos de fabricación de un ciclo orgánico Rankine

COSTOS DE FABRICACION CICLO RANKINE ORGANICO					
Componentes	Unidad		Cantidad	Valor	Total
Tanque	L	500	1	\$185.300	\$ 185.300
Bomba hidráulica	L/min	28,3834	1	\$1.785.000	\$ 1.785.000
ICP	kW	58,9027	1	\$ 6.210.859	\$ 6.210.859
Compresor	kW	15,3711	1	\$168.764	\$ 168.764
Condensador	kW	57,4126	1	\$ 809.200	\$ 809.200
Tubería PVC	3 m	1 1/4"	6	\$32.100	\$ 192.600
Tubería cobre	6m	1 1/4"	6	\$306.343	\$ 1.838.058
Codo PVC	1"	1 1/4"	6	\$5.700	\$ 34.200
Valvula de cheque	1"	1 1/4"	3	\$164.994	\$ 494.982
Válvula universal PVC	1"	1 1/4"	1	\$33.400	\$ 33.400
Codo Cobre	1"	1 1/4"	7	\$12.145	\$ 85.015
PLC	1		1	\$855.200	\$ 855.200
TERMOSTATO	1		1	\$88.309	\$ 88.309
Presostato	1		1	\$120.000	\$ 120.000
				Total	\$ 12.900.887
Factor mano de obra de instalación				1,50%	\$ 1.935.133
				Total	\$ 14.836.020

Fuente: elaboración propia

Tabla 38. Costos de fabricación de un ciclo Rankine

COSTOS DE FABRICACION CICLO RANKINE					
Componentes	unidad		Cantidad	Valor	Total
Tanque	L	500	1	\$185.300	\$ 185.300
Bomba hidráulica	L/min	28,3834	2	\$1.785.000	\$ 3.570.000
Caldera	BHP	30	1	\$ 13.000.000	\$ 13.000.000
Condensador	kW	57,4126	1	\$809.200	\$ 809.200
Tubería PVC	3m	1 1/4"	6	\$32.100	\$ 192.600
Tubería cobre	6m	1 1/4"	6	\$306.343	\$ 1.838.058
Codo PVC	1"	1 1/4"	6	\$5.700	\$ 34.200
Válvula de cheque	1"	1 1/4"	3	\$164.994	\$ 494.982
Válvula universal PVC	1"	1 1/4"	1	\$33.400	\$ 33.400
Codo Cobre	1"	1 1/4"	7	\$12.145	\$ 85.015
Total					\$ 20.242.755
Factor mano de obra de instalación				1,50%	\$ 303.641
Total					\$ 20.546.396

Fuente: elaboración propia

Realizando una comparación entre ambas tablas de costos como análisis financiero del proyecto, se obtiene que la implementación del ciclo Rankine orgánico ofrece un ahorro económico de \$5.710.376.

6. EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL

Para el desarrollo de esta evaluación se empleó el método Conesa. Este método es conocido para determinar el nivel de impacto ambiental de un proyecto. Para esto, se dividió en una parte cualitativa y una cuantitativa. De esa manera, se evaluaron las etapas de instalación que generaron impacto en el medioambiente.

A continuación, se presentan los criterios con los que se definió la parte cuantitativa.

Tabla 39. Criterios de evaluación

Signo		Intensidad (i) *	
Beneficioso	+	Baja	1
Perjudicial	-	Total	12
Extensión (EX)		Momento (MO)	
Puntual	1	Largo plazo	1
Parcial	2	Medio plazo	2
Extenso	4	Inmediato	4
Total	8	Critico	8
Critica	12		
Persistencia (PE)		Reversibilidad (RV)	
Fugaz	1	Corto plazo	1
Temporal	2	Medio plazo	2
Permanente	4	Irreversible	4
Sinergia (SI)		Acumulación (AC)	
Sin sinergismo	1	Simple	1
Sinérgico	2	Acumulativo	4
Muy sinérgico	4		
Efecto (EF)		Periodicidad (PR)	
Indirecto	1	Irregular	1
Directo	4	Periódico	2
		Continuo	4
Recuperabilidad (MC)		$I = \pm [3i + 2EX + MO + PE + RV + SI + AC + EF + PR + MC]$	
Recup. Inmediato	1		
Recuperable	2		
Mitigable	4		
Irrecuperable	8		

Fuente: MINISTERIO DE AMBIENTE Y CONTROL DE DESARROLLO SUSTENTABLE. Metodología para el cálculo de las matrices ambientales. [En línea]. [s.f.]. Disponible en: <http://www.ambiente.chubut.gov.ar/wp-content/uploads/2015/01/Methodolog%C3%ADa-para-el-Calculo-de-las-Matrices-Ambientales.pdf>, p. 2

De acuerdo con estos criterios de evaluación, el valor resultante para (I) varió:

Tabla 40. Valores resultantes para (I), método Conesa

Valor I (13 y 100)	Calificación	Significado
< 25	BAJO	La afectación del mismo es irrelevante en comparación con los fines y objetivos del Proyecto en cuestión
25 ≥ < 50	MODERADO	La afectación del mismo, no precisa prácticas correctoras o protectoras intensivas.
50 ≥ < 75	SEVERO	La afectación de este, exige la recuperación de las condiciones del medio a través de medidas correctoras o protectoras. El tiempo de recuperación necesario es en un periodo prolongado
≥ 75	CRITICO	La afectación del mismo, es superior al umbral aceptable. Se produce una pérdida permanente de la calidad en las condiciones ambientales. NO hay posibilidad de recuperación alguna.

Fuente: MINISTERIO DE AMBIENTE Y CONTROL DE DESARROLLO SUSTENTABLE. Metodología para el cálculo de las matrices ambientales. [En línea]. [s.f.]. Disponible en: <http://www.ambiente.chubut.gov.ar/wp-content/uploads/2015/01/Metodolog%C3%ADa-para-el-Calculo-de-las-Matrices-Ambientales.pdf>, p. 3

Finalmente, la matriz quedó conformada con las siguientes categorías:

Valor I Ponderado	Calificación	Categoría
< 2,5	BAJO	
2,5 ≥ < 5	MODERADO	
5 ≥ < 7,5	SEVERO	
≥ 7,5	CRITICO	
Los valores con signo + se consideran de impacto nulo		

Fuente: MINISTERIO DE AMBIENTE Y CONTROL DE DESARROLLO SUSTENTABLE. Metodología para el cálculo de las matrices ambientales. [En línea]. [s.f.]. Disponible en: <http://www.ambiente.chubut.gov.ar/wp-content/uploads/2015/01/Metodolog%C3%ADa-para-el-Calculo-de-las-Matrices-Ambientales.pdf>, p. 5

Teniendo en cuenta el proceso a seguir para la correcta evaluación del método Conesa, se procede con la elaboración de la matriz cualitativa en donde se marcan los elementos del ecosistema que pueden ser afectados por las diferentes actividades que conlleva el desarrollo del proyecto.

De acuerdo con esto para la actividad de “transporte de equipos” se tiene que afectaría los suelos, el aire, el ecosistema terrestre y el factor económico. Los suelos podrían verse afectados visualmente en los paisajes en donde el proyecto sea instalado, ya que, este se ubicaría en medio de la naturaleza. El aire se vería afectado por el ruido que generaría el sistema en acción. En cuanto al ecosistema, se podrían ver afectados el conjunto de organismos que vivan en este espacio natural ya sea por invasión a su espacio, ruido y/o contaminación. Finalmente, la economía se puede ver afectada de forma positiva ya que el desarrollo y activación de este sistema generaría trabajo en el lugar de su ubicación.

La actividad de “remoción de la capa vegetal” afectaría los elementos; suelo, aire y el factor económico. El suelo podría verse afectado sus propiedades físicas, como también visualmente el paisaje, al ser removidas algunas capas vegetales para la instalación del proyecto. Esto claramente también remueve el factor económico de manera positiva al generar empleo con la realización de este proceso.

La actividad de “construcción de la cimentación” y “ensamble” son unas de las actividades que más elementos afecta: agua, suelo, aire y los factores social y económico. Esto ya que, la construcción del proyecto podría influir en la contaminación del agua, cambiar las propiedades físicas de los suelos y afectar visualmente los paisajes del terreno, así como la producción de material particulado que contamine el aire. Por otro lado, los factores social y económico, se vería afectados positivamente de nuevo, ya que esta acción generaría empleo y con esto, actividad económica, más aún, teniendo en cuenta que el objetivo del proyecto es la alimentación de una turbina para generar energía eléctrica, es decir, servicios públicos.

De acuerdo con esto, la elaboración de la matriz cualitativa del método ya antes mencionado, queda de la siguiente manera:

Tabla 41. Matriz cualitativa, evaluación Conesa

MATRIZ CUALITATIVA												
ELEMENTO	Agua		Suelo		Aire		Ecosistemas terrestres		Social		Económico	
Actividad	Calidad del agua	Dinámica fluvial	Propiedades físicas y químicas	Paisajes	Material particulado, gases y	Ruido	Biotopos	Biocenosis	Dinámica poblacional	Servicios públicos	Actividades económicas	Empleo
Transporte de equipos				X		X		X			X	X
Remoción de la capa vegetal			X	X	X						X	X
Construcción de la cimentación	X		X	X	X					X	X	X
Ensamblaje			X	X	X						X	X
Producción de energía				X		X				X	X	X

Fuente: elaboración propia

Tabla 42. Matriz cuantitativa, evaluación Conesa

MATRIZ CUANTITATIVA														
Elemento	Impacto ambiental	NATURAL EZA	EXTENSION	INTENSIDAD	MOMENTO	DURACION	REVERSIBILIDAD	SINERGIAS	ACUMULACION	EFECTO	PERIODICIDAD	RECUPERABILIDAD	IMPORTANCIA AMBIENTAL	IMPACTO
Agua	Modificación de la calidad del agua. (Remoción de la capa vegetal)	(-)	2	3	2	1	1	4	1	1	1	2	26	IMPACTO MODERADO
Suelo	Cambios de las propiedades físicas y químicas (construcción)	(-)	1	5	4	2	2	4	1	4	2	2	38	IMPACTO MODERADO
Aire	Material particulado, gases y olores (ensamble)	(-)	4	7	2	2	2	4	4	4	4	2	53	SEVEROS
Ecosistema terrestre	Afectación a biotopos (producción de energía)	(-)	4	6	2	2	2	1	4	1	2	2	42	SEVEROS
Social	Implementación de un servicio público (Producción de energía)	(+)	1	3	1	2	1	1	1	1	4	1	23	IRRELEVANTE
Económico	Genera empleo (ensambles)	(+)	4	9	4	4	1	1	1	4	4	1	55	IMPACTO MODERADO

Fuente: elaboración propia

Posterior a la aplicación del método Conesa como evaluación de Impacto ambiental en el presente proyecto, se obtuvo que el desarrollo de este representa una actividad moderada. Esto último quiere decir que se deben tener precauciones y llevar un control periódico sobre los posibles daños que proporciona el sistema al medioambiente.

7. CONCLUSIONES

- A partir de los resultados obtenidos por el método empleado se permite clasificar el sistema de evaporación por subsistemas en donde en base a las necesidades y los parámetros de entrada de diseño se escogen los diferentes componentes ideales para el desarrollo óptimo del mismo, de esta manera entonces el sistema es diseñado para trabajar con un sistema de bomba de calor para la evaporación de refrigerante que trabajará con un intercambiador de placas y adicional, una resistencia eléctrica para el sistema de calentamiento de agua.
- Con el diseño detallado se determinan los componentes críticos del sistema, los cuales cumplen con los parámetros de diseño establecidos. Se realizan los cálculos pertinentes para a partir de ellos seleccionar en el mercado dichos componentes.
- A partir del diseño detallado se calcula también el diseño hidráulico del sistema con sus respectivas pérdidas por fricción y accesorios de la tubería. Se establece así una tubería de PVC de 1 ¼" de diámetro para conducir el agua, y una tubería de cobre con el mismo diámetro para conducir el refrigerante, cada una con sus respectivas longitudes.
Así mismo queda ilustrado el diseño de un tablero de control para que con este se ponga en marcha y se manipule el proceso del sistema.
- Desde los manuales se permite guiar de manera óptima y efectiva el uso correcto del sistema, desde su manual de instalación en donde se especifica paso a paso el orden y la manera adecuada en que debe ser ubicado cada componente; el manual de operación en donde primero se explica el modo en que debe operar el sistema y luego el modo en que debe ser operado. Finalmente, el manual de mantenimiento en donde se especifican las inspecciones que deben ser realizadas al sistema y el periodo del tiempo que se recomienda para cada una de ellas, así mismo queda adjunto la ficha técnica del sistema en donde se ilustra un plano general del mismo, sus especificaciones, listado de partes y proveedores nacionales e internacionales para los diferentes repuestos que puedan ser necesarios para el mantenimiento del proyecto.
- El costo del sistema de evaporación de refrigerante que hace referencia a un ciclo Rankine orgánico es inferior a la implementación de un sistema de evaporación con un ciclo Rankine, cumpliendo también con la mayoría de los parámetros de diseño establecidos. Por otro lado, en la evaluación de impacto

ambiental se concluye que el desarrollo e implementación del proyecto tiene un impacto moderado, lo que significa que se requiere de precauciones y un control periódico a los posibles daños que este pueda proporcionar al medioambiente.

8. RECOMENDACIONES

- Se recomienda cumplir con las dimensiones establecidas en cuanto a espesor y largo de tuberías, así como también la ubicación de los componentes y el distanciamiento entre ellos.
- Se recomienda aislar correctamente la tubería de cobre con un aislante térmico para evitar pérdidas de calor hacia el exterior.
- Se sugiere techar el lugar en donde se desee instalar el proyecto para no dejar a la intemperie los equipos y evitar corrosión en los mismos.
- Se recomienda implementar un PLC tipo industrial con un IP66 ya que este sería un PLC a prueba de polución y condiciones ambientales húmedas.
- Seguir los pasos de instalación y funcionamiento de los diferentes componentes seleccionados de los respectivos catálogos de fabricante ya que estos fueron seleccionados.

BIBLIOGRAFÍA

ALFA LAVAL. Programa de cálculo, refrigeración, refrigeración comercial, evaporación. [En línea]. [15 de agosto de 2020]. Disponible en: <https://productguide.alfalaval.com/products/c013?country=ES&language=es-ES>

BROTOTERMIC. Resistencias eléctricas calefactores. [En línea]. [s.f.]. Disponible en: <http://www.brototermic.com/docs/catalogo-resistencias-calefactoras.pdf>

ÇENGEL, Yunus y BOLES, Michael. Termodinámica. Cuarta edición. México: McGraw Hill, 2003.

ÇENGEL, Yunus y BOLES, Michael. Termodinámica. Séptima edición. México: McGraw Hill, 2011.

COLMACCOIL. Evaporadores exclusivos – enfriadores Baudelot. [En línea]. [s.f.]. Disponible en: <http://www.colmaccoil.com/es/productos/evaporadores-de-refrigeraci%C3%B3n/evaporadores-exclusivos/enfriadores-baudelot.aspx>

COLOMBIA. SECRETARIO DISTRITAL DE AMBIENTE. Resolución Número 6982 de 2011. [Por la cual se dictan normas sobre prevención y control de la contaminación atmosférica por fuentes fijas y protección de la calidad del aire]. Bogotá, D.C., 2011

CONSEJO COLOMBIANO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA. Reglamento técnico de instalaciones térmicas en edificaciones. RITE 2017. [En línea]. [2017]. Disponible en: http://www.cceecol.org/images/archivos/Biblioteca/RITE_2017_FINAL.pdf

DOSSAT, Roy. Principios de refrigeración. México: CECSA, 2001.

DÍAZ, Alba. Psicometría [en línea]. 2009. Disponible en <https://avdiaz.files.wordpress.com/2009/01/i-unidad3.pdf>

EBARA COLOMBIA. Catálogo técnico CDX. [En línea]. [s.f.]. Disponible en: <https://www.ebaracolombia.com/images/catalogo-tecnico-CDX.pdf>

EBARA. Tarifa catálogo [en línea]. s.f. Disponible en <http://www.ebara.es/catalogos-tecnicos/>

ELÉCTRICAS BOGOTÁ. PLC serie XC3 14E / 10S. [En línea]. [2010]. Disponible en: <http://www.electricasbogota.com/detalles/-plc/1630-68054>

ELÉCTRICAS BOGOTÁ. Termostato conexión a proceso 0 a +90 °C, 20ª. [En línea]. [2010]. Disponible en: <http://www.electricasbogota.com/detalles/termostatos/1469-71091>

ELÉCTRICAS BOGOTÁ. Interruptor de presión para controlar Compresores 115/230V 50/60Hz [En línea]. [2010]. Disponible en: <http://www.electricasbogota.com/detalles/presostatos/5470-92194>

EMERSON. Catálogo general de productos 2019 para refrigeración, aire acondicionado y bombas de calor. [En línea]. [s.f.]. Disponible en: <https://climate.emerson.com/documents/copeland-y-alco-controls-catalogo-general-de-productos-2019-es-es-5375994.pdf>.

FRANCO, Juan. Manual de refrigeración. Barcelona: Editorial Reverté, 2012.

GUNT. Tuberías en la refrigeración. [En línea]. [s.f.]. Disponible en: https://gunt.de/images/download/piping_spanish.pdf

HOSTELERÍA10.COM. Enfriadores de líquidos y barriles. [En línea]. [s.f.]. Disponible en: <https://hosteleria10.com/frio/enfriadores-de-liquidos/>

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Diagnóstico ambiental y lineamientos para el uso sostenible del área Caño Limón- Estéreo de Lipa. [En línea]. [julio de 2000]. Disponible en: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/011031/canolimon.pdf>

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC-1486-6166. Bogotá D.C. El instituto, 2018 ISBN 9789588585673 153 p.

LLORENS, Martín y MIRANDA, Ángel. Ingeniería Térmica. Barcelona: Marcombo, 2009.

MARTÍNEZ, Francisco y VELASCO, Eloy. Bombas de calor y energías renovables en edificios. New York: Thomson, 2005.

MINISTERIO DE AMBIENTE Y CONTROL DE DESARROLLO SUSTENTABLE. Metodología para el cálculo de las matrices ambientales. [En línea]. [s.f.]. Disponible en: <http://www.ambiente.chubut.gov.ar/wp-content/uploads/2015/01/Metodolog%C3%ADa-para-el-Calculo-de-las-Matrices-Ambientales.pdf>

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Manual de buenas prácticas en refrigeración. [En línea]. [2014]. Disponible en: <http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/Manual-Buenas-Practicas-Refrigeraci%C3%B3n.pdf>.

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Unidad Técnica Ozono – UTO. [En línea]. [2020]. Disponible en: <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/604-plantilla-asuntos->.

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Legislación. [En línea]. [2020]. Disponible en: <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article?id=197:plantilla-asuntos-ambientales-y-sectorial-y-urbana-sin-galeria-13>.

MIRANDA, Ángel. Manual técnico de refrigerantes. Barcelona: Marcombo, 2012.

MOTT, Robert. Mecánica de fluidos. Sexta edición. México: Pearson Educación, 2006.

MUÑUMEL, José. Propuesta de operación y mantenimiento del sistema de aire acondicionado del Centro Monaca. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Sartenejas: Universidad Simón Bolívar, 2012.

PAVCO WAVIN. Tubería CPVC para agua caliente – HotPro. [En línea]. [2020]. Disponible en: <https://pavcowavin.com.co/tuberia-hotpro-para-agua-caliente>

THERMO-COIL LTDA. Serpentes, condensadores y evaporadores. [En línea]. [2018]. Disponible en: <https://thermocoil.com/wp-content/uploads/2018/04/serpentes.pdf>

TUVALREP. Tubería rígida sobre tipo M, L y K. [En línea]. [2020]. Disponible en: <https://tuvalrep.com.co/producto/tuberia-rigida-cobre-nacobre/>


WANG, Shan. Refrigerants, refrigeration cycles, and refrigeration systems. Segunda edición. New York: McGraw-Hill Education, 2001.

WEATHER SPARK. Clima promedio en Arauca, Colombia, durante todo el año. [En línea]. [s.f.]. Disponible en: <https://es.weatherspark.com/y/26641/Clima-promedio-en-Arauca-Colombia-durante-todo-el-a%C3%B1o>

ANEXOS

ANEXO A. COTIZACIÓN TUBERÍA DE POLIPROPILENO PARA AGUA CALIENTE.

Home > Remodelación y Construcción > Plomería > Tubos y Accesorios para Agua > Tubos Polipropileno > Tubería Polipropileno 40mm 1 1/4" x 4m



Dícol
Tubería Polipropileno 40mm 1 1/4" x 4m
Código 212869
★★★★★ 0.0 (0)
\$32.100 UNIDAD
Hecho en Colombia

- 1 + Agregar al carro

Fuente: HOMECENTER. Home, Remodelación y construcción, Plomería, Tubos y accesorios para agua, Tubos polipropileno, Tubería polipropileno 40 mm 1 1/4" x 4m. [En línea]. [s.f.]. Disponible en: <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/212869/Tuberia-Polipropileno-40mm-1-1-4%22-x-4m/212869>

**ANEXO B.
COTIZACIÓN TUBERÍA DE COBRE DE 1 1/4".**

Lista de Precios - Tubería y Accesorios Cobre

Descripción	Referencia	Diámetro	Precio Unidad
Tubería México			
Tipo L	31510040	1 1/4"	306,343
	31510050	1 1/2"	399,972
	31510060	2"	684,681
	31510070	2 1/2"	954,479
	31510080	3"	1,454,444
	31510090	4"	2,363,472

Fuente: COVAL. Productos, Tuberías y accesorios mecánicos, Cobre, Tubería – Accesorios, Lista de precios. [En línea]. [s.f.]. Disponible en: https://coval.com.co/pdfs/listasprecios/ult_cobre.pdf

**ANEXO C.
COTIZACIÓN CODO COBRE DE 90°.**


Lista de Precios - Tubería y Accesorios Cobre

Codo 90 107	31412010	1/2"	1,265
	31412020	3/4"	3,118
	31412030	1"	7,239
	31412040	1 1/4"	12,145
	31412050	1 1/2"	17,323
	31412060	2"	42,620
	31412070	2 1/2"	65,533
	31412080	3"	117,777

Fuente: COVAL. Productos, Tuberías y accesorios mecánicos, Cobre, Tubería – Accesorios, Lista de precios. [En línea]. [s.f.]. Disponible en: https://coval.com.co/pdfs/listasprecios/ult_cobre.pdf


ANEXO D. COTIZACIÓN CODO EN POLIPROPILENO 40MM – 1 1/4".

Home > Remodelación y Construcción > Plomería > Tubos y Accesorios para Agua > Tubos y Accesorios PPR y Termofusión > Codo 90 polipropileno 40mm (1 1/4pul)



Vesbo/BR
Codo 90 polipropileno 40mm (1 1/4pul)
Código 303396
★★★★★ 0.0 (0)
\$5.700 UND


- 1 + Agregar al carro

 **Satisfacción Garantizada** [ver más](#)
Si este producto no cumple con tus necesidades tienes 30 días para acercarte a cualquiera de nuestros almacenes o comunicarte con la línea de atención al cliente en Bogotá: 3077115 o a la línea Nacional: 320 88 999 33


Fuente: HOMECENTER. Home, Remodelación y construcción, Plomería, Tubos y accesorios para agua, Tubos y accesorios PPR y termofusión , Codo 90 polipropileno 40 mm 1 1/4" x 4m. [En línea]. [s.f.]. Disponible en: <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/303396/Codo-90-polipropileno-40mm-1-1-4pul/303396>

ANEXO E. COTIZACIÓN TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE 500 L.


Home > Remodelación y Construcción > Plomería > Tanque 500 Litros



Colempaques
Tanque 500 Litros
Código 31651
★★★★★ 4.5 (2)
\$184.900 UND

 Hecho en Colombia

- 1 + Agregar al carro

 **Satisfacción Garantizada**
Si este producto no cumple con tus necesidades tienes 30 días para acercarte a cualquiera de nuestros almacenes o comunicarte con nuestra línea de atención al cliente en Bogotá: 3077115 o a la línea nacional 320 88 999 33.

Danos tu opinión

Fuente: HOMECENTER. Home, Remodelación y construcción, Plomería, Tanque 500 L. [En línea]. [s.f.]. Disponible en: <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/31651/tanque-500-litros>

ANEXO F. COTIZACIÓN AISLANTE TÉRMICO PARA TUBERÍA DE COBRE.

Volver al listado | Herramientas y Construcción > Herramientas > Otros Compartir | Vender



Nuevo - 1 vendido

**Rubatex 1/4 - 3/8 - 1/2 - 5/8
- 3/4 - 7/8**

\$ 21.000

Stock disponible

12 cuotas de \$ 1.750 sin interés

 Ver los medios de pago

Envío \$ 12.000
Llega entre el 29 oct. y el 3 nov.
[Ver más opciones](#)

Fuente: MERCADO LIBRE. Herramientas y construcción, Herramientas. [En línea]. [s.f.]. Disponible en: <https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-554228236-rubatex-14-38-12-58-34-78->

[_JM?matt_tool=45425669&matt_word&matt_source=google&matt_campaign_id=9870388064&matt_ad_group_id=100262586957&matt_match_type&matt_network=u&matt_device=c&matt_creative=431446932634&matt_keyword&matt_ad_position&matt_ad_type&matt_merchant_id=267907363&matt_product_id=MCO554228236&matt_product_partition_id=409933523197&matt_target_id=pla-409933523197&gclid=Cj0KCQjwit_8BRCoARIsAIx3Rj5pbWWtK4yLkxtv0bAx5yAxtAv9zjy3DWS40t--KqsjvAinkFneBbkaAne_EALw_wcB&quantity=1](https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-554228236-rubatex-14-38-12-58-34-78-JM?matt_tool=45425669&matt_word&matt_source=google&matt_campaign_id=9870388064&matt_ad_group_id=100262586957&matt_match_type&matt_network=u&matt_device=c&matt_creative=431446932634&matt_keyword&matt_ad_position&matt_ad_type&matt_merchant_id=267907363&matt_product_id=MCO554228236&matt_product_partition_id=409933523197&matt_target_id=pla-409933523197&gclid=Cj0KCQjwit_8BRCoARIsAIx3Rj5pbWWtK4yLkxtv0bAx5yAxtAv9zjy3DWS40t--KqsjvAinkFneBbkaAne_EALw_wcB&quantity=1)

**ANEXO G.
COTIZACIÓN VÁLVULA UNIVERSAL 1 1/4".**

LISTA DE PRECIOS

LÍNEA PESADA

REF.	VÁLVULA DE BOLA EN PVC TIPO PESADA SOLDAR	PRECIO DE LISTA	UNIDAD DE DESPACHO
3011	Pesada 1/2" soldar	\$ 13.487	192
3039	Pesada 3/4" soldar	\$ 18.124	72
3041	Pesada 1" soldar	\$ 24.902	96
3084	Pesada 1 1/4" soldar	\$ 33.395	30
3070	Pesada 1 1/2" soldar	\$ 43.813	40
3074	Pesada 2" soldar	\$ 67.997	48

Fuente: COVAL. Productos, Válvulas, Registros y cheques, Registros y cheques, Lista de precios. [En línea]. [s.f.]. Disponible en: https://coval.com.co/pdfs/listasprecios/ult_pcp.pdf

**ANEXO H.
COTIZACIÓN VÁLVULA DE CHEQUE 1 1/4".**

Cheques			
Descripción	Referencia	Diámetro	Precio Unidad
Cheque roscado RedWhite	072010	1/2	60,954
	072020	3/4	82,507
	072030	1	117,017
	072040	1 1/4	164,994
	072050	1 1/2	226,211
	072060	2	358,868

Fuente: COVAL. Productos, Válvulas, Registros y cheques, Registros y cheques, Lista de precios. [En línea]. [s.f.]. Disponible en: https://coval.com.co/pdfs/listasprecios/ult_registros_cheques.pdf

**ANEXO I.
COTIZACIÓN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE PLACAS 62,3 KW.**

El precio del intercambiador es:

1370 usd +iva
Modelo: ACH 70X-62M-S25
Puesto en Miami

Saludos.



Fuente: FROZTEC COLOMBIA LTDA. Directorio. [En línea]. [s.f.]. Disponible en:
<https://www.froztec.com/es/empresa/directorio>

**ANEXO J.
COTIZACIÓN CONDENSADOR.**



Razón Social: NESTOR CARDOZO
 Contacto: NESTOR CARDOZO
 Dirección: _____
 Teléfono: 3106305319
 Ciudad: Bogotá-Colombia

Cotización No.: BOG-26-10-2020
 Asesor Comercial: MARIA GUERRERO
 Fecha: 26/10/2020
 Teléfono: 317-6849391

CODIGO	DESCRIPCION	ESPECIFICACION	UNID.	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
CRT-000273	COND. 2.0 HP	CON 01 MOTOVENTILADOR DE 400 MM	UND.	1	\$680.000	\$680.000

Fuente: THERMO COIL. Home, Contacto. [En línea]. [s.f.]. Disponible en: <https://thermocoil.com/contacto/>

ANEXO K. COTIZACIÓN ELECTROBOMBA.

Revisando su solicitud, la bomba que me solicita es un modelo europeo que trabaja a 50Hz y que no traemos Colombia. Para el punto de operación informado, le puedo ofrecer la bomba más pequeña que tenemos pero entrega mayor cabeza dinámica.

- Modelo: CDX 70/076
- Precio unitario neto: \$1.500.000+IVA
- Tiempo de entrega: 2-3 días después de la OC y pago anticipado
- Lugar de entrega: Sus instalaciones

Anexo la curva del equipo con la información técnica para su revisión.

Cordial saludo.



Edinson F. Guillén Cruz
Ingeniero de Aplicaciones y Soporte
Teléfono (+571) 8269865
Celular (+57) 3153592033
edinson.guillen@ebaracolombia.com

Ebara Bombas Colombia S.A.S.
Calle 98 70-91 Piso 10 Oficina 1016
Centro Empresarial Pontevedra
Bogotá - Colombia


Looking ahead,
going beyond expectations
Ahead Beyond

ebaracolombia.com

Fuente: EBARA COLOMBIA. Contáctenos. [En línea]. [s.f.]. Disponible en:
<https://www.ebaracolombia.com/>

ANEXO L. COTIZACIÓN PLC.

Industrias y Oficinas > Otros Compartir | Ver







Nuevo

Plc Serie Xc3 14e / 10s


\$ 855.200

Stock disponible

 36 cuotas de \$ 23.756

[Ver los medios de pago](#)

 Entrega a acordar con el vendedor
Medellín, Antioquia

[Ver costos de envío](#)

Cantidad: 1 Unidad (1000 disponibles)

Fuente: MERCADO LIBRE. Industria y oficinas, Otros. [En línea]. [s.f.]. Disponible en: <https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-481910993-plc-serie-xc3-14e-10s-JM?quantity=1>

ANEXO M. COTIZACIÓN TERMOSTATO.

Volver al listado | Herramientas y Construcción > Herramientas > Instrumentos de Medición > Otros Instrumentos de Medición | Compartir | V



Nuevo

Termostato Conexion A Proceso 0 A +90°C, 20a Marca Rainbow

\$ 88.309

Stock disponible

36 cuotas de \$ 2.453

VISA Mastercard

Ver los medios de pago

Envío gratis

Llega entre el 29 oct. y el 3 nov.
Beneficio Mercado Puntos

Ver más opciones

Cantidad: 1 Unidad (5 disponibles)

Fuente: MERCADO LIBRE. Herramientas y construcción, Herramientas, Instrumentos de medición, Otros instrumentos de medición. [En línea]. [s.f.]. Disponible en: <https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-503001928-termostato-conexion-a-proceso-0-a-90c-20a-marca-rainbow-JM?quantity=1>

ANEXO N. COTIZACIÓN PRESOSTATO.

Volver al listado | Herramientas y Construcción > Herramientas > Herramientas Eléctricas > Compresores Compartir | Vender



Nuevo - 3 vendidos

Presostato / Automatico Para Compresor Trifasico

\$ 120.000

Stock disponible

36 cuotas de \$ 3.333

 Ver los medios de pago

 **Envío gratis**
Llega entre el 29 oct. y el 3 nov.
Beneficio Mercado Puntos
[Ver más opciones](#)

Frecuencia: **60 kHz**

Cantidad: 1 Unidad (3 disponibles)

Fuente: MERCADO LIBRE. Herramientas y construcción, Herramientas, Herramientas eléctricas, Compresores. [En línea]. [s.f.]. Disponible en: https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-565814427-presostato-automatico-para-compresor-trifasico-JM?matt_tool=45425669&matt_word&matt_source=google&matt_campaign_id=9870388064&matt_ad_group_id=100262586957&matt_match_type&matt_network=u&matt_device=c&matt_creative=431446932634&matt_keyword&matt_ad_position&matt_ad_type&matt_merchant_id=126063831&matt_product_id=MCO565814427&matt_product_partition_id=409933523197&matt_target_id=pla-409933523197&gclid=Cj0KCQjwit_8BRCoARIsAix3Rj7VwBjfBWdL2DqALx631kR1x8fNMz1xVT8IWEDrxxBLkIEDC8yUVsaArfsEALw_wcB&quantity=1&variation=57698162094