



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO PARA
LA TORRE DE DESTILACIÓN DEL LABORATORIO DE PROCESOS
INDUSTRIALES, ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA DE LA
FACULTAD DE CIENCIAS”**

ANDRES SEBASTIAN MORENO AVILA

CRISTIAN JEFFERSON TOSCANO GAVILANES

TRABAJO DE TITULACIÓN

TIPO: PROYECTOS TÉCNICOS

Previa a la obtención del título de:

INGENIERO QUÍMICO

DIRECTOR: ING.HANNIBAL LORENZO BRITO M

RIOBAMBA-ECUADOR

2017

©2017 Andrés Sebastián Moreno Ávila - Cristian Jefferson Toscano Gavilanes.

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

El Tribunal de trabajo de titulación certifica que: “IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO PARA LA TORRE DE DESTILACIÓN DEL LABORATORIO DE PROCESOS INDUSTRIALES, ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA DE LA FACULTAD DE CIENCIAS”, es responsabilidad de los señores Andrés Sebastián Moreno Ávila - Cristian Jefferson Toscano Gavilanes, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal de Titulación, quedando autorizada su presentación.

FIRMA

FECHA

Ing. Hannibal Brito Moina PhD.

DIRECTOR DEL TRABAJO

DE TITULACIÓN

Ing. Valeria Tapia

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Nosotros, Andrés Sebastián Moreno Ávila - Cristian Jefferson Toscano Gavilanes, declaramos que el Trabajo de Titulación tipo Proyecto Técnico denominado: “IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO PARA LA TORRE DE DESTILACIÓN DEL LABORATORIO DE PROCESOS INDUSTRIALES, ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA DE LA FACULTAD DE CIENCIAS” es original y de nuestra autoría personal tanto resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

En tal virtud, declaramos que el contenido es de nuestra responsabilidad legal y académica presentes en el trabajo de titulación.

Riobamba, 19 de octubre del 2017

Andrés Sebastián Moreno Ávila

Cedula de Identidad: 050322006-3

Cristian Jefferson Toscano Gavilanes

Cedula de Identidad: 160051498-6

Nosotros, Andrés Sebastián Moreno Ávila - Cristian Jefferson Toscano Gavilanes, somos responsables de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en este Trabajo de Titulación, el patrimonio intelectual del Trabajo de Titulación pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Andrés Sebastián Moreno Ávila

Cedula de Identidad: 050322006-3

Cristian Jefferson Toscano Gavilanes

Cedula de Identidad: 160051498-6

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	Pp
RESUMEN	xiii
ABSTRACT.....	xiii
 CAPITULO I	
1. DIAGNÓSTICO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	1
1.1 Identificación del Problema	1
1.2 Justificación del proyecto	2
1.3 Línea base del Proyecto	2
1.3.1 Reconocimiento del lugar de la investigación.....	2
1.3.2 Estado actual del Equipo.....	3
1.3.3 Metodología	7
 CAPITULO II	
2. OBJETIVOS DEL PROYECTO	18
2.1. Objetivos.....	18
2.1.1 General	18
2.1.2 Específicos	18
 CAPITULO III	
3. ESTUDIO TÉCNICO	19
3.1. Localización del proyecto.....	19
3.1.1. Condiciones climáticas del entrono.....	19
3.1.2. Condiciones geográficas	20
3.1.3. Localización Geográfica	21
3.2. Ingeniería del Proyecto	22
3.2.1. Terminología	23
3.2.2. Sistema de enfriamiento.....	29
3.2.3. Diseño del sistema de enfriamiento.....	31
3.2.4. Tabla de Resultados.....	48
3.2.5. Validación del equipo.	49
3.2.6. Análisis de costo.....	58
3.2.7. Análisis y discusión de resultados.....	63

CONCLUSIONES	63
RECOMENDACIONES	65
BIBLIOGRAFÍA	66
ANEXOS	67

ÍNDICE DE TABLAS

	Pp
Tabla 1-1	Descripción de los elementos de la torre destilación.....9
Tabla 2-1	Principales variables de operación de la torre de destilación.....10
Tabla 3-1	Alternativa 1 para el dimensionamiento del sistema de enfriamiento.....11
Tabla 4-1	Alternativa 2 para el dimensionamiento del sistema de enfriamiento.....11
Tabla 5-1	Valoración de los criterios de selección de las alternativas de sistema de enfriamiento.....13
Tabla 6-1	Estadística descriptiva de los resultados de la valoración del grado de satisfacción de los criterios de selección de las alternativas de sistema de enfriamiento.....14
Tabla 7-1	Componentes del refrigerante 404 ^a17
Tabla 8-1	Propiedades Físicas del refrigerante 404 ^a17
Tabla 1-3	Condiciones climáticas de la ciudad de Riobamba.....20
Tabla 2-3	Localización geográfica de la ciudad de Riobamba.....21
Tabla 3-3	Datos para el calor removido.....36
Tabla 4-3	Datos para el calor removido.....37
Tabla 5-3	Datos para la capacidad de calor de remoción.....38
Tabla 6-3	Datos para el caudal máximo a refrigerar.....39
Tabla 7-3	Datos para la superficie de la capa.....44
Tabla 8-3	Datos para la longitud del tubo.....45

Tabla 9-3	Resultados del dimensionamiento del sistema de enfriamiento alternativa 2.....	48
Tabla 10-3	Comparación de las variables obtenidas mediante cálculos de ingeniería vs. Datos reales obtenidos en el laboratorio.....	53
Tabla 11-3	Comparación de las variables obtenidas mediante cálculos de ingeniería sin el sistema de enfriamiento vs. datos reales obtenidos en el laboratorio con el sistema de enfriamiento.....	57
Tabla 12-3	Tanque de almacenamiento.....	59
Tabla13-3	Accesorios.....	59
Tabla14-3	Equipos.....	61
Tabla 15-3	Químicos.....	61
Tabla 16-3	Mano de obra.....	61
Tabla 17-3	Transporte.....	61
Tabla18-3	Alimentación.....	62
Tabla 19-3	RECURSOS TOTALES.....	62
Tabla 20-3	Análisis de los resultados en la validación VS sin la implementación del sistema de enfriamiento.....	64

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pp
FIGURA 1-1	DISEÑO DE LA TORRE DE DESTILACION.....8
FIGURA 1-3	Localización Geográfica del laboratorio de Procesos Industriales de la ESPOCH.....22
FIGURA 2-3	Dimensiones sugeridas por la norma API- ASME para el diseño de tanques de almacenamiento.....32

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Pp

GRÁFICO 1-1	Valoración de los criterios de selección de las alternativas de sistema de enfriamiento.....	14
GRÁFICO 1-3	Comparación del flujo de destilado en datos sin el sistema de enfriamiento vs. Datos reales tomados con el sistema de enfriamiento en la prueba de laboratorio obtenido en la cabeza de la torre.....	54
GRÁFICO 2-3	Comparación del calor removido al flujo de destilado en datos sin el sistema de enfriamiento vs. Datos reales tomados con el sistema de enfriamiento en la prueba de laboratorio.....	55
GRAFICO 3-3	Comparación del flujo de agua de refrigeración en datos calculados por métodos de ingeniería vs. Datos reales tomados en la prueba de laboratorio obtenido en la cabeza de la torre.....	58

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A. ALTERNATIVA 1

ANEXO B. ALTERNATIVA 2

ANEXO C. DIAGRAMA DEL EQUIPO EXTERNO

ANEXO D. DIAGRAMA DEL EQUIPO INTERNO

RESUMEN

El objetivo fue implementar un sistema de enfriamiento para la torre de destilación del Laboratorio de Procesos Industriales, de la Facultad de Ciencias, Escuela de Ingeniería Química de la Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, se inició con un análisis global de la torre de destilación. Se realizó el reconocimiento del funcionamiento y condiciones actuales del equipo, y se llegó a generalizar que los problemas de la torre fueron ocasionados por la deficiente refrigeración en la zona de enriquecimiento. En base a los métodos experimentales, se plantearon dos diseños de acuerdo a cálculos de ingeniería, escogiendo el que cumpla con los requisitos de rendimiento, tomando en cuenta las alternativas planteadas de diseño, se optó por la segunda siendo así un sistema de enfriamiento que se adicionará a la torre de destilación en el proceso de recirculación para el condensado, se realizó un trabajo demostrativo del diseño planteado. Los resultados del diseño fueron de una razón de alimentación de 5,9 kg/h, la cantidad de calor removido del vapor destilado fue 93,84 kg/h, logrando así que la temperatura final del destilado sea de 286° K, de acuerdo con esto se concluyó que al realizar la validación del equipo mediante la operación de destilación de alcohol artesanal se obtuvo un grado alcohólico máximo de 95 °G, lo que indica un aumento en la eficiencia del equipo de destilación de 30% a 66,98%, verificando que el sistema de enfriamiento obtuvo una remoción de calor de 41,28 watts en el flujo de destilado y 65,75 watts en el equipo de refrigeración. Se recomienda automatizar su respectivo procedimiento para una mayor facilidad de uso y verificación del proceso que se lleva a cabo.

Palabras Clave: <INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA QUÍMICA >, <DESTILACIÓN DE ALCOHOL>, <TORRE DE DESTILACIÓN>, <SISTEMA DE ENFRIAMIENTO>, <RENDIMIENTO DE DESTILACIÓN>, < EFICIENCIA>, >, <REMOCIÓN DE CALOR>.

ABSTRACT

The objective was to implement a cooling system for distillation tower of the industrial process laboratory, Science Collage, Chemical Engineering Major of Escuela Superior Politecnica de Chimborazo, began with a global analysis of the distillation tower. The current operation and equipment conditions were recognized, and it was generally assumed that the problems of the tower were caused by poor cooling the enrichment zone. Based on the experimental methods, two designs were proposed according to engineering calculations, choosing the one that meets the performance requirements, taking into account the proposed design, the second was a cooling system to add to the distillation tower in the recirculation process for the condensate, a demonstration of the proposed design was carried out. The results of the design were of a feed ratio of 5.9 Kg/h, the amount of heat removed from the distilled steam was 93.84 Kg/h, thus achieving the final temperature of the distillate 286 K, according with this it was concluded that when the equipment was validated by the alcohol distillation operation, a maximum alcoholic strength of 95 °G was obtained, indicating an increase in the efficiency of the distillation equipment from 30 % to 66.98 %, verifying that the system of cooling obtained a heat removed of 41.28 watts in the distillation flow and 65.75 watts in the cooling equipment. It is recommended to automate their respective procedure for greater ease of use and verification of the process that it is carried out.

KEYWORDS: ENGINEERING AND CHEMICAL TECHNOLOGY, ALCOHOL DISTILLATION, DESTILLATION TOWER, COOLING SYSTEM, DISTILLATION PERFORMANCE, EFFICIENCY, HEAT REMOVAL.

CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

1.1 Identificación del Problema

Dentro del laboratorio de Procesos Industriales perteneciente a la Escuela Superior Politécnica del Chimborazo se disponía de una torre de destilación con la cual se realizan operaciones de separación de líquidos para el aprendizaje y experimentación a escala de laboratorio, no obstante dicho equipo no contaba con un sistema de enfriamiento adecuado, por lo cual existían pérdidas de energía (principalmente en forma de calor), en valores no aceptables generando que el proceso de destilación no se ejecutará de manera eficiente y no se obtenga los resultados deseados.

Los equipos dispuestos dentro del Laboratorio de Procesos Industriales están establecidos principalmente para la experimentación a escala de laboratorio de los procesos que se generan dentro de organizaciones industriales a escala mayor. Es por ello que las variables dentro de los equipos de laboratorio deben estar controladas hasta niveles de precisión muy altos, en vista a que dichos la valoración de la magnitud de las variables de los procesos permiten formular modelos del sistema industrial estudiado, cuyo grado de exactitud depende en sobre-medida de la exactitud de los datos tomados experimentalmente. No obstante, y en vista a la inexistencia de un sistema de enfriamiento que garantice la condensación de los vapores de destilación dentro de la columna, los valores determinados experimentalmente dentro de dicho equipo no permitían, por su poca exactitud, formular modelos que puedan, con niveles de error aceptable, representar a los procesos con que se buscaba experimentar, lo cual generaba que toda la información recopilada por medio de la experimentación con la torre de destilación sean obsoletos, o su manejo sea muy complejo y los resultados que se obtenían sean muy poco exactos y poco aplicables.

1.2 Justificación del proyecto

Dentro de los procesos estudiados en la Ingeniería Química la destilación representa una operación unitaria ampliamente aplicable. Para el correcto proceso de formación universitaria es pertinente incorporar a la impartición de conocimientos teóricos la experimentación a escala de laboratorio con los procesos que se busca conocer, para poder verificar las hipótesis planteadas teóricamente con el comportamiento real de los fenómenos analizados. Para lograr dicha integración se debe disponer de equipos a escala de laboratorio diseñados de tal manera que todas las variables del proceso sean controladas, para poder obtener datos experimentales y resultados valederos para su posterior análisis y correlación con la teoría, es por ello que resultó pertinente implementar una torre de destilación que disponga de las características funcionales y de control necesarias para una correcta experimentación.

Previa a la ejecución del presente trabajo investigativo, la torre de destilación para experimentación dentro del laboratorio de Procesos Industriales perteneciente a la Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, operaba sin un sistema de enfriamiento que permita la correcta condensación de los destilados, lo cual generaba grandes pérdidas de calor, baja eficiencia en la obtención del destilado y dificultad en el control de las variables de proceso. Para evitar dicha falencia en la funcionalidad de la torre, propuso y ejecutó el diseño y construcción de un sistema de enfriamiento para ser implementado en el equipo en mención dispuesto dentro del laboratorio de procesos industriales, logrando de esta manera mejorar ampliamente la finalidad de dicho equipo.

1.3 Línea base del Proyecto

1.3.1 Reconocimiento del lugar de la investigación

El presente trabajo investigativo se realizó en el laboratorio de procesos industriales de la facultad de Ciencias de la Escuela superior politécnica de Chimborazo, para lo cual se inició con un recorrido por los equipos que posee dicho laboratorio, haciendo un análisis global de los mismos, posterior a esto se tuvo un diálogo con el encargado del normal funcionamiento del laboratorio, donde a través de preguntas tales como: ¿Qué sugerencias usted recomendaría para el trabajo investigativo?, ¿Qué equipos presentan problemas en su diseño o funcionamiento?, y ¿Qué se puede corregir en el laboratorio?; se llegó a la conclusión de que la torre de destilación

presenta problemas al momento de la refrigeración del vapor condensado, por lo que se planteó técnicas y métodos para corregir este problema y con lo cual se logrará un funcionamiento adecuado de la torre de destilación lo que permitirá aumentar el rendimiento de la misma, y beneficiará a estudiantes y docentes que hagan uso del equipo.

1.3.2 Estado actual del Equipo

La torre está dividida en platos en donde el alcohol evaporado va ascendiendo a causa de una fuerza ligera generada por la diferencia de presiones existentes entre plato-plato. Una vez elevada la temperatura en la parte superior de la torre el alcohol pasa por un proceso de enfriamiento en un condensador por el que fluye agua, el alcohol pasará por una etapa de retroalimentación para conseguir mayor concentración. La destiladora de alcohol que actualmente se usa en el laboratorio de procesos industriales consta de siete platos, como se ilustra en la fotografía 1-1.



Fotografía 1-2 Torre de Destilación

Realizado Por: Moreno. A, Toscano. C. 2017

1.3.2.1 Operación del equipo de destilación

- **Calentamiento de la Torre** Para que la destilación se lleve a cabo se necesita calentar la columna del equipo hasta llegar a la temperatura de ebullición del etanol y estabilizarla. En este caso el calor es suministrado por un caldero que genera vapor hasta una presión máxima de 60 psi.
- **Alimentación del Producto** La alimentación se controlada con una válvula de paso la cual se debe accionar en cantidades mínimas para evitar que el vapor y el líquido drenado reaccionen por el cambio de temperatura que se genera y la torre se enfríe.
- **Regulación de la temperatura** La temperatura de la torre debe ser lo más estable posible y cercana al punto de ebullición del etanol para que el alcohol se concentre en mayores cantidades es la cima de la columna, los operadores del equipo estabilizaban la temperatura en un rango de 75°C a 80°C.
- **Condensación** En esta etapa el alcohol en forma gaseosa pasa por un proceso de enfriamiento que consiste en reducir la temperatura con ayuda del agua condensando el vapor de alcohol, para esto se necesita un flujo constante de agua que circule constantemente por el condensador.
- **Reflujo** El reflujo regula la cantidad de alcohol que es retroalimentado hacia la zona de enriquecimiento de la torre, mientras la llave no se abra el alcohol se sigue enriqueciendo obteniendo más grados de concentración y la temperatura permanece estable. Una vez obtenido la concentración de alcohol finalmente pasa por un nuevo condensador obteniendo el producto final, en caso de no satisfacerse con los grados de alcohol obtenidos se vuelve a ingresar como alimentación y pasara nuevamente por el proceso de destilación. (GARCÍA, 2013, pp. 30-31)

1.3.2.2 Diagrama del proceso de destilación

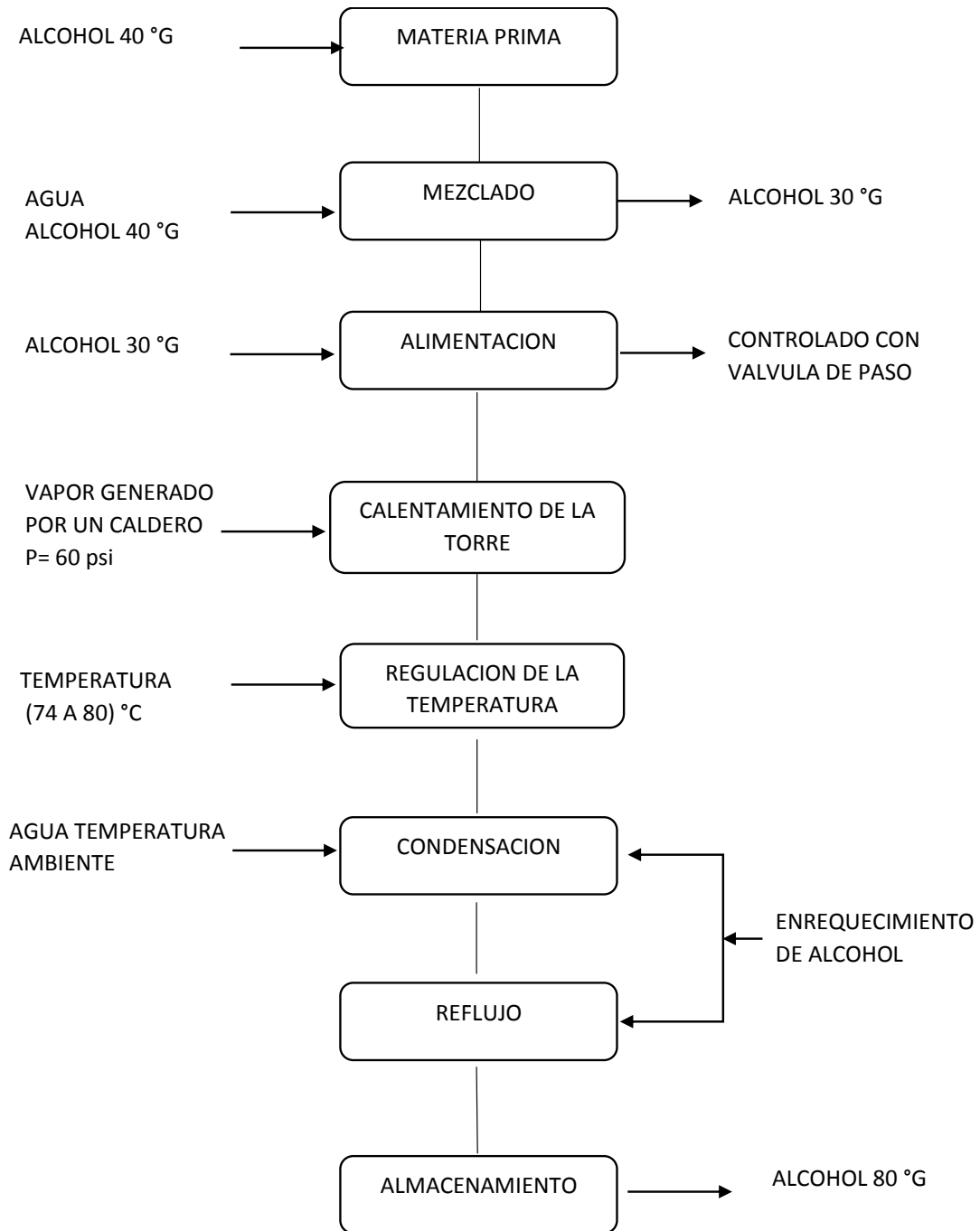


DIAGRAMA 1-1 Proceso de Destilación

Realizado Por: Moreno. A, Toscano. C. 2017

1.3.2.3 Diagrama del proceso de destilación con el sistema de enfriamiento

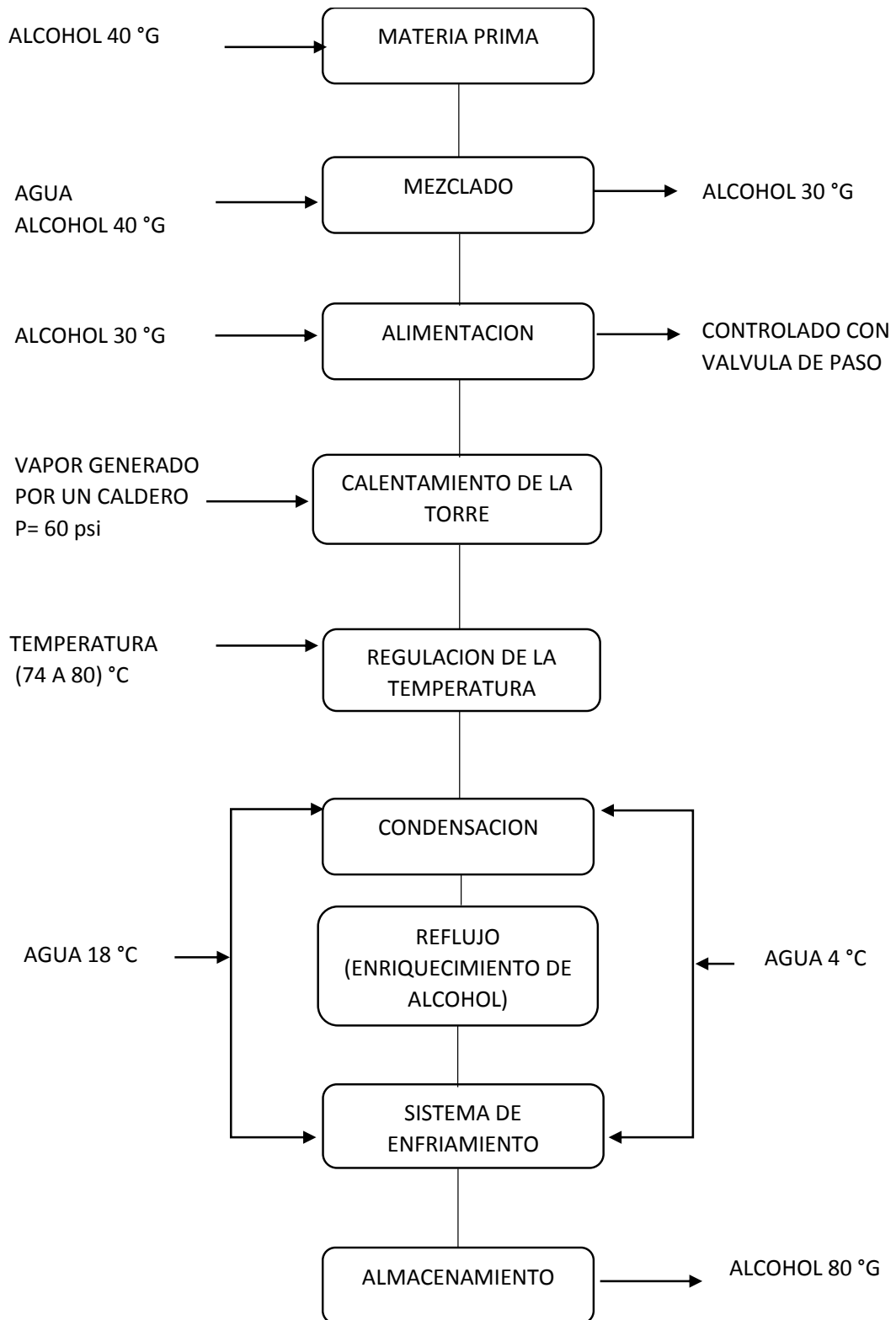


DIAGRAMA 2-1 Diagrama del proceso de destilación con el sistema de enfriamiento

Realizado Por: Moreno. A, Toscano. C. 2017

1.3.3. Metodología

1.3.3.1 Método inductivo

El método inductivo le permitió al investigador conocer el funcionamiento y condición actual del equipo, ya que se hizo mediante una observación detallada de los procesos que se llevaban a cabo en la torre de destilación y cuál es el principal problema que enfrentaba en la refrigeración del condensado obtenido en la zona de enriquecimiento de la columna de destilación, con lo cual permitió establecer premisas de la totalidad del problema y como resolverlo, este método se basó en la abstracción de los conocimientos y la generación de hipótesis en donde intervinieron todos los factores que afecta a normal funcionamiento de la torre y como mejorar sus condiciones de operación, generando conocimiento de la problemática.

1.3.3.2 Método deductivo

Una vez conocidos los problemas que presenta la operación de la torre mediante técnicas de inducción, se lleva a la generalización de que los problemas de funcionamiento de la torre están siendo ocasionados por la deficiente refrigeración en la zona de enriquecimiento, por lo cual si se quiere aumentar el rendimiento del equipo se debe solucionar los problemas de refrigeración con lo cual se mejora las condiciones de operación, toda esta generalización se lograr atreves de las inferencias que se tomaron en los métodos deductivos y se apunta a resolver las hipótesis generadas por el pensamiento crítico, para la resolución de los problemas emplearán técnicas que permitan el rediseño de la torre mejorando los proceso y la calidad de transformación.

1.3.3.3 Análisis de resultados

- **Definición del problema de diseño**

El principal pilar para un correcto diseño de ingeniería está representado por la formulación y delimitación del problema de ingeniería que se buscó desenvolver con la propuesta técnica. En el caso del presente proyecto tecnológico, el problema de ingeniería estuvo representado por la poca eficiencia de la columna de destilación, específicamente la inadecuada operatividad de la sección de condensación, en vista a que el agua de enfriamiento utilizada (del sistema de alimentación de agua para el laboratorio) presentaba una temperatura no adecuada (temperatura ambiental de hasta 27°C) y un caudal muy bajo para poder remover el calor de la fracción gaseosa a recuperar hasta el punto de condensar dicho flujo.

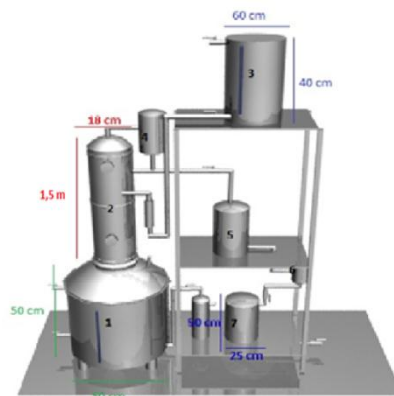
En base a la delimitación del problema, el cual estuvo representado por la poca eficiencia de condensación dentro de la columna, se formuló una propuesta, la cual estuvo representada por la implementación de un sistema de enfriamiento del agua para condensación. (Smith, 1991, pp. 51-52)

- **Descripción de la torre de destilación**

El sistema de enfriamiento diseñado e implementado dentro del presente trabajo de investigación fue construido para la torre de destilación que genera la purificación del aceite usado procedente de vehículos por medio de separación de fases de distinto punto de ebullición.

“La torre de destilación, objeto de estudio, contienen los elementos operativos descritos dentro de la figura 1-1.” (MEDINA CARRILLO & SÁNCHEZ SALINAS, 2012, pp. 23-24-25)

Figura 1-2 Diseño De La Torre De Destilación



Fuente: Medina Carrillo & Sánchez Salinas, 2012

Tabla 1-1 Descripción de los elementos de la torre destilación

IDENTIFICACIÓN	ELEMENTO
1	Calderín con Camisa de Vapor
2	Columna de Destilación
3	Tanque de Alimentación
4	Deflemador de Lentejas
5	Enfriador de Lentejas
6	Botella de Grados
7	Tanque de Producto
8	Tubería de PVC
9	Tubería de Acero Inoxidable

Fuente: Medina Carrillo & Sánchez Salinas, 2012

Dentro de la tabla 2-1 se describen las principales variables de operación con las que trabaja la torre de destilación objeto de estudio.

Tabla 2-1 Principales variables de operación de la torre de destilación.

PARÁMETROS	CANTIDAD	UNIDADES
Flujo de alimentación (F)	400	mL/h
Flujo del destilado (D)	162,71	mL/h
Flujo del residuo (W)	237,28	mL/h
Fracción alimentación (XF)	0,5	-
Fracción destilado (XD)	0,85	-
Fracción residuo (XW)	0,26	
Diámetro de la columna (\emptyset)	0,11	M
Longitud de la columna (z)	1,42	M
Distancia entre platos	0,15	M
Número de platos	7	-
Plato de alimentación	3	-
Temperatura promedio de la columna (T)	133,9	°C
Fluidez (ϕ)	8,45	cP
Viscosidad (μ)	0,12	cP
Densidad del aceite parafínico residual (ρ)	0,849	g/mL
Zona de Agotamiento	0,0099	m ²
Flujo del gas (G)	4557,67	Kg/h*m ²
Caudal de Vapor (V)	45,17	Kg/h
Zona de Rectificación	0,01	m ²
Flujo del gas (G)	2973,59	Kg/h*m ²
Caudal de Vapor (V)	31,33	Kg/h

Fuente: Medina Carrillo & Sánchez Salinas, 2012

La columna de destilación, anteriormente a la realización del presente proyecto de investigación, se alimentaba de agua para enfriamiento desde la red del laboratorio de manera directa y sin sistemas de presión, por lo cual, debido a la temperatura de la fase gaseosa dentro de la columna, no se generaba la correcta condensación de dicho flujo, por lo cual, la eficiencia del equipo de purificación no era la adecuada, es por ello que se optó por implementar un sistema de refrigeración para el agua de enfriamiento, logrando la condensación de la corriente de vapor hasta niveles aceptables.

- **Formulación de las posibles alternativas de dimensionamiento.**

Tabla 3-1 Alternativa 1 para el dimensionamiento del sistema de enfriamiento

ALTERNATIVA 1			
valor de la capa fría	$S_h = \frac{q}{\frac{h_h h_c}{h_c + h_h} \eta_h \theta_m}$	0.15 m ²	CON FACTOR DE SEGURIDAD $S_h = 0.3m^2$
diámetro interior del tubo	$S_h = \pi d_i L$	0.12 m	-

Realizado Por: Moreno, A y Toscano, C. 2017.

Tabla 4-1 Alternativa 2 para el dimensionamiento del sistema de enfriamiento

ALTERNATIVA 2			
Valor de la capa fría es	$S_h = \frac{q}{\frac{h_h h_c}{h_c + h_h} \eta_h \theta_m}$	0.096 m ²	CON FACTOR DE SEGURIDAD $S_h = 0,192 m^2$
Largo del tubo que conforma el espiral	$S_h = \pi d_i L$	5,09m	-
Paso	$paso = \frac{H_{espiral}}{N_{giros}}$	0.075 m	-
Longitud de giro	$L_{giro} = \frac{L_{tubo}}{N_{giros}}$	0,64 m	-
Diámetro de la hélice	$L_{giro} = \pi * D_{elice}$	0.20 m	-
ángulo de inclinación de la espiral	$\tan \alpha = \frac{paso}{D_{elice}}$	20,5°	-

Realizado Por: Moreno, A y Toscano, C. 2017.

❖ Definición de los criterios de selección, la síntesis de soluciones

En vista a que, dentro del diseño de ingeniería, para una misma situación problemática, existen múltiples vías para alcanzar el propósito planteado dentro de los objetivos, resultado pertinente definir criterios de selección que permitieron discriminar las opciones y guiaran en la selección de la vía más factible. Dentro de los criterios de selección para el diseño del sistema de enfriamiento se presentaron:

Que el sistema pueda ser implementado en la torre de destilación del Laboratorio de Procesos Industriales de la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, tanto en base a las dimensiones físicas del sistema, como a la compatibilidad operacional.

- El costo de construcción e implementación se ajuste al presupuesto establecido dentro del anteproyecto.
- Que con la implementación del sistema se logre mejorar la eficiencia de la torre de destilación, en función a la destilación de la fase gaseosa a recuperar en la columna de destilación.
- Que la construcción del sistema de enfriamiento sea factible dentro del entorno y con materiales que permitan una vida útil mayor a 5 años.
- Que permita la experimentación del proceso de destilación, es decir, que el sistema facilite la recolección de datos para su posterior análisis.
- Que el consumo energético sea racional en función a las dimensiones del equipo y corrientes de operación.

❖ Análisis de las alternativas

Una vez establecidas las alternativas se realizó el análisis de las mismas, considerando como elemento discriminante los criterios de selección previamente establecidos. Para ello en primer lugar se verificó el cumplimiento de los criterios de selección por parte de cada una de las alternativas, descartando aquellas que no cumplieran con uno o alguno de los discriminantes. En caso de tener más de una opción viable posterior a la aplicación del paso anterior se procedió a verificar en qué nivel cada una de las opciones cumple con los discriminantes, para posteriormente seleccionar únicamente aquella alternativa que satisfacía, en mayor medida, todos los criterios de selección.

Tanto las alternativas 1 y 2 satisfacen los criterios de selección, es por ello que se realizó la valoración del grado de cumplimiento de cada uno de los criterios establecidos, valorando a cada alternativa con puntuaciones de 1 a 10 en cada criterio de selección. En el caso en que la alternativa cumplía con el criterio mínimamente, la valoración obtenida fue cercana a 1, en tanto que si la alternativa cumplía satisfactoriamente con el criterio de selección, la valoración registrada fue cercana a 10, como se describe dentro de la tabla 5-1.

Tabla 5-1 Valoración de los criterios de selección de las alternativas de sistema de enfriamiento.

CRITERIO	ALTERNATIVA	VALORACIÓN
Factibilidad de instalación dentro de la torre de destilación	Primera alternativa	7
	Segunda alternativa	8
Costo constructivo	Primera alternativa	5
	Segunda alternativa	4
Mejora en la eficiencia de la condensación	Primera alternativa	8
	Segunda alternativa	10
Vida útil y facilidad en el mantenimiento	Primera alternativa	6
	Segunda alternativa	8
Facilidad en la experimentación	Primera alternativa	8
	Segunda alternativa	10

Realizado Por: Moreno, A y Toscano, C. 2017.

Al realizar el análisis de los resultados obtenidos referentes a la valoración del grado de cumplimiento de los criterios de selección de cada una de las alternativas de sistema de enfriamiento se pudo concluir que la mejor alternativa está representada por el Tanque agitado de enfriamiento por contacto directo del agua de condensación, en vista a que dicha alternativa presento una valoración de cumplimiento de los criterios, en promedio, igual a 8,00 puntos, en tanto que la primera alternativa presentó una valoración promedio igual a 6,80 puntos, como muestra dentro de la tabla 5-1 y gráfico 1-

Tabla 2-1 Estadística descriptiva de los resultados de la valoración del grado de satisfacción de los criterios de selección de las alternativas de sistema de enfriamiento.

VARIABLE	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar	Varianza	
	Estadístico	Estadístico	Estadístico	Estadístico	Error estándar	Estadístico	Estadístico
PRIMERA ALTERNATIVA	5	5,00	8,00	6,8000	,58310	1,30384	1,700
SEGUNDA ALTERNATIVA	5	4,00	10,00	8,0000	1,09545	2,44949	6,000
N válido (por lista)	5	-	-	-	-	-	-

Realizado Por: Moreno, A y Toscano, C. 2017.

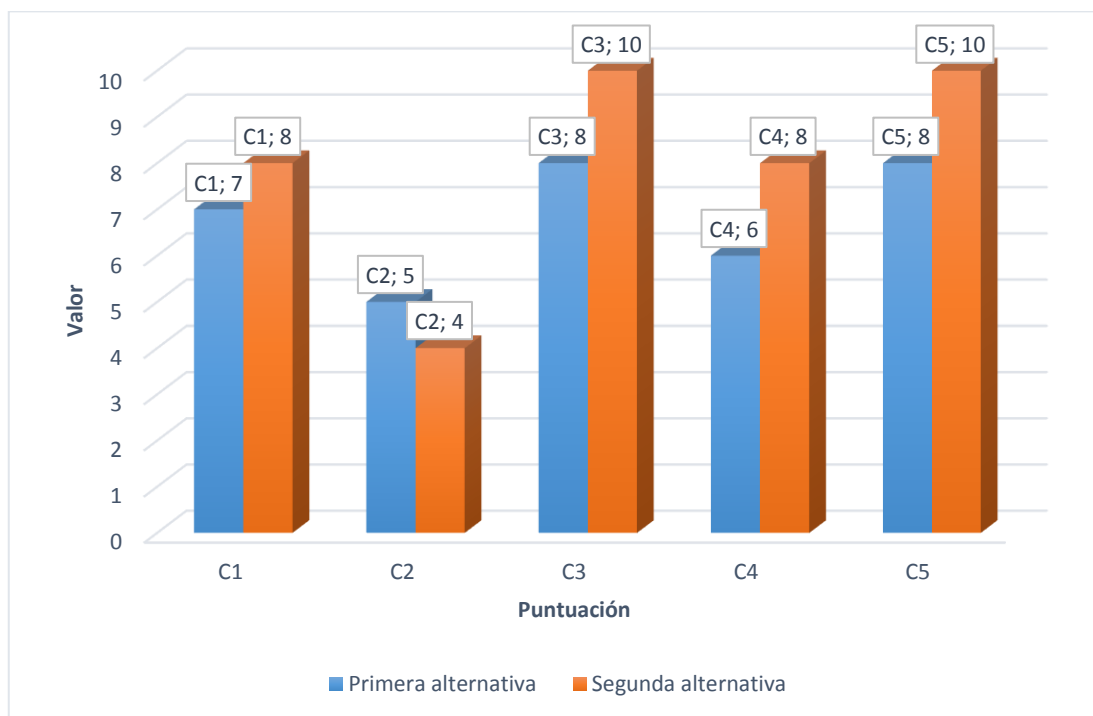


GRÁFICO 1-1 Valoración de los criterios de selección de las alternativas de sistema de enfriamiento

Realizado Por: Moreno, A y Toscano, C. 2017.

❖ Construcción de prototipos

Al determinar la alternativa más factible, en base a la valoración de los criterios de selección, se procedió al desarrollar las especificaciones de diseño, en base a la memoria de cálculo, es decir, se procedió a detallar las dimensiones y condiciones de operación del sistema de enfriamiento seleccionado. Posteriormente se procedió a la construcción del sistema en base al diseño, tomando las siguientes consideraciones:

- Aplicar materiales que toleren la acción corrosiva de las temperaturas, condiciones, corrientes y sustancias con que opera el sistema de enfriamiento.
- Utilizar materiales que sean compatibles con los materiales de los cuales está construida la torre de destilación.
- Ajustar la construcción al presupuesto disponible y detalles de diseño.
- Seguridad en la operación del sistema de enfriamiento.

1.3.3.4 Técnicas

Siguiendo la secuencia de análisis y el método experimental, una vez conocido los problemas en la torre de destilación se buscó generar herramientas que resuelvan los problemas planteados en la presente investigación, para lo cual se partió de técnicas de laboratorio para poder escoger los parámetros de referencia y las variables que deben ser controladas para lograr la máxima refrigeración de la corriente de vapor generado por la absorción de calor en la torre, se conoce que las variables a tratar es la temperatura lo cual se debe tener una interacción idónea para obtener una calidad de enfriamiento, lo cual el método más factible es adicionar un sistema con refrigerante para tener un enfriamiento adecuado.

Se toma en cuenta que la destilación es fraccionada, para esto hemos realizado prácticas de laboratorio, lo cual se enfoca en la destilación de alcohol artesanal, se empieza con un alcohol al 30°G, al llegar a la temperatura deseada de 75 °C- 80°C el alcohol empieza a pasar por la torre hacia los condensadores; he ahí el inconveniente a solucionar, ya que para la condensación se ha ocupado agua a temperatura ambiente y sin recirculación, lo que causa una remoción de calor

baja y no efectiva dentro del proceso para su condensación, al realizar varias prácticas de laboratorio damos la propuesta de un sistema de enfriamiento con recirculación de agua, lo cual el agua sale a una temperatura de 4 °C y tiene un retorno de 18 °C, así logra una mayor cantidad de remoción de calor.

Se hizo el análisis de costos y de capacidad para bajar la temperatura, también el caudal adecuado para el máximo enfriamiento del vapor y el tiempo de refrigeración, todo este parámetro se determinó mediante el empleo de balances de masa y energía, técnicas aprendidas en el curso de la carrera de ingeniería química y que permitirán optimizar los procesos llevados a cabo y ampliarán el rendimiento de las operaciones en la torre.

1.3.3.5 Métodos experimentales

Al realizar la práctica con el sistema de enfriamiento, pero a temperatura ambiente y sin recirculación no se da buenos resultados, para esto proseguimos a realizar otros tipos de prácticas de laboratorio con distintos tipos de enfriamiento. Para obtener un mejor resultado en el sistema de enfriamiento, recurrimos al uso de un refrigerante para el sistema de enfriamiento, lo cual mejore la eficiencia, el rendimiento del equipo y economice costos.

Para esto se escoge el refrigerante según la unidad a trabajar, los valores de las unidades de refrigeración van de 0.5, $\frac{3}{4}$ y 1, cada una respectivamente según su capacidad de refrigeración. Se escoge la unidad $\frac{3}{4}$ por su capacidad de refrigeración, luego se determina el refrigerante a ocupar, esto debe ser según el costo, beneficio y menor contaminación hacia al ambiente.

Entre estos podemos escoger R-134a, R-404A, R-507; se utiliza el R-404^a ya que la unidad trabaja con este refrigerante y también es amigable con el ambiente. El R-404^a es una mezcla ternaria compuesta por: R-125, R-143A y R-134A.

El R-404A es muy poco tóxico incluso con exposiciones prolongadas de tiempo. El AEL (Allowable Exposure Limit) es de 1000 ppm (8 horas, TWA).

Se caracteriza por su notable estabilidad química y un bajo desplazamiento de temperatura. Su principal aplicación son las instalaciones nuevas para bajas y medias temperaturas.

Tabla 7-1 Componentes del refrigerante 404^a.

Nombre químico	% en peso	N°. CE
1,1,1,2- Tetrafluoroetanoo (R-134a)	4	212-377-0
Pentafluoroetano (R-125)	44	206-557-8
1,1,1-Trifluoroetano (R-143a)	52	206-996-5

Fuente: Lomas. A 2017

Tabla 8-1 Propiedades Físicas del refrigerante 404a.

PROPIEDADES FISICAS		R-404 A
Peso molecular	g/mol	97.61
Temperatura de ebullición	°C	-46.45
Deslizamiento temperatura de ebullición	°K	0.7
Temperatura critica	°C	72.07
Presión critica	bar abs	37.31
Densidad critica	Kg/m ³	484
Densidad del líquido 25°C	Kg/m ³	1048
Densidad del líquido -25°C	Kg/m ³	1236
Densidad del vapor saturado	Kg/m ³	5.41
Presión de vapor 25°C	bar abs	12.42
Presión de vapor -25°C	bar abs	2.49
Calor latente de vaporización	kJ/kg	200
Calor específico del liquido	kJ/kg.k	1.64
Calor específico del vapor	kJ/kg.k	0.88
Conductividad térmica de líquido	w/mk	0.064
Conductividad térmica de vapor	w/mk	0.0143
Solubilidad del agua	Ppm	Despreciable
Límite de inflamabilidad	% vol	ninguno
Toxicidad	Ppm	1000
ODP	-	0
PCA (GWP)	-	3922

Fuente: Lomas. A 2017

CAPITULO II

2. OBJETIVOS DEL PROYECTO

2.1. Objetivos

2.1.1. General

Implementar un sistema de enfriamiento para la torre de destilación del Laboratorio de Procesos Industriales, de la Facultad de Ciencias, Escuela de Ingeniería Química de la Escuela Superior Politécnica del Chimborazo.

2.1.2. Específicos

- Caracterizar las condiciones de operación actuales de la torre de destilación.
- Definir las variables de operación para el sistema de enfriamiento de la torre de destilación.
- Dimensionar el sistema de enfriamiento con los respectivos cálculos de ingeniería.
- Construir el sistema de enfriamiento en base al dimensionamiento y periodo de vida de operación establecido.
- Validar el sistema de enfriamiento implementado para la torre de destilación.

CAPÍTULO III

3. ESTUDIO TÉCNICO

3.1. Localización del proyecto

El presente proyecto tecnológico fue implementado en la Provincia de Chimborazo, en la ciudad de Riobamba, dentro de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en la Facultad de Ciencias, específicamente dentro del Laboratorio de Procesos Industriales perteneciente a la Escuela de Ingeniería Química.

3.1.1. Condiciones climáticas del entrono

El clima de la zona de influencia del proyecto investigativo presento generalmente condiciones de un entorno frío. La zona de desarrollo del proyecto (Ciudad de Riobamba) presenta dos estaciones, una estación húmeda y una estación seca. Los vientos en la ciudad de Riobamba producen una sensación térmica próxima a los 0 °C en algunas épocas del año, en tanto que la máxima temperatura diaria alcanzo hasta los 25 °C a 27 °C, no obstante, en escasas ocasiones la temperatura ascendió a más de los 27 °C. Las condiciones climáticas promedio de la ciudad de Riobamba se describen en la tabla 1-3. (Muñoz, 2017, pp. 98-99)

Tabla 1-3 Condiciones climáticas de la ciudad de Riobamba.

CONDICIÓN	MES												
	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
Temperatura máxima absoluta, (°C).	27	28	27	28	28	26	27	28	29	28	27	28	27
Temperatura máxima media, (°C).	20	21	20	20	19	19	19	19	19	21	20	20	19
Temperatura mínima media, (°C).	10	10	7	4	5	3	3	6	9	4	7	9	7
Temperatura mínima absoluta, (°C).	1	1	-2	-4	0	0	-3	-1	2	0	0	1	-2

Fuente: Muñoz. A 2017

3.1.2. Condiciones geográficas

La ciudad de Riobamba se encuentra ubicada al norte de la provincia de Chimborazo, ocupa parte de la hoya del río Chambo y de las vertientes internas de las cordilleras Oriental y Occidental de Los Andes, lugar donde está ubicada la llanura Tapi, sobre la cual se levanta la ciudad. El cantón Riobamba está limitado al Norte por los cantones Guano y Penipe; al Sur por los cantones Colta y Guamote; al Este por el cantón Chambo y la provincia de Morona Santiago; y, al Oeste por las provincias de Bolívar y Guayas. La ciudad de Riobamba está ubicada a 2.754 metros sobre el nivel del mar. (McCabe, 2000, pp. 69-70)

3.1.3. Localización Geográfica

La localización geográfica correspondiente a la ciudad de Riobamba se detalla en la tabla 2-3.

Tabla 2-3 Localización geográfica de la ciudad de Riobamba.

ELEMENTO	UBICACIÓN
Continente	América
País	Ecuador
Provincia	Chimborazo
Cantón	Riobamba
Altitud	2822 m.s.n.m
Localización coordenada Utm	17 M 758393.95 m E UTM 9817026.05 m S
Localización geográficas Coordenadas	78°40'39.24"de longitud occidental y a1°39'14.58" de latitud sur.

Realizado Por: Moreno, A y Toscano, C. 2017.

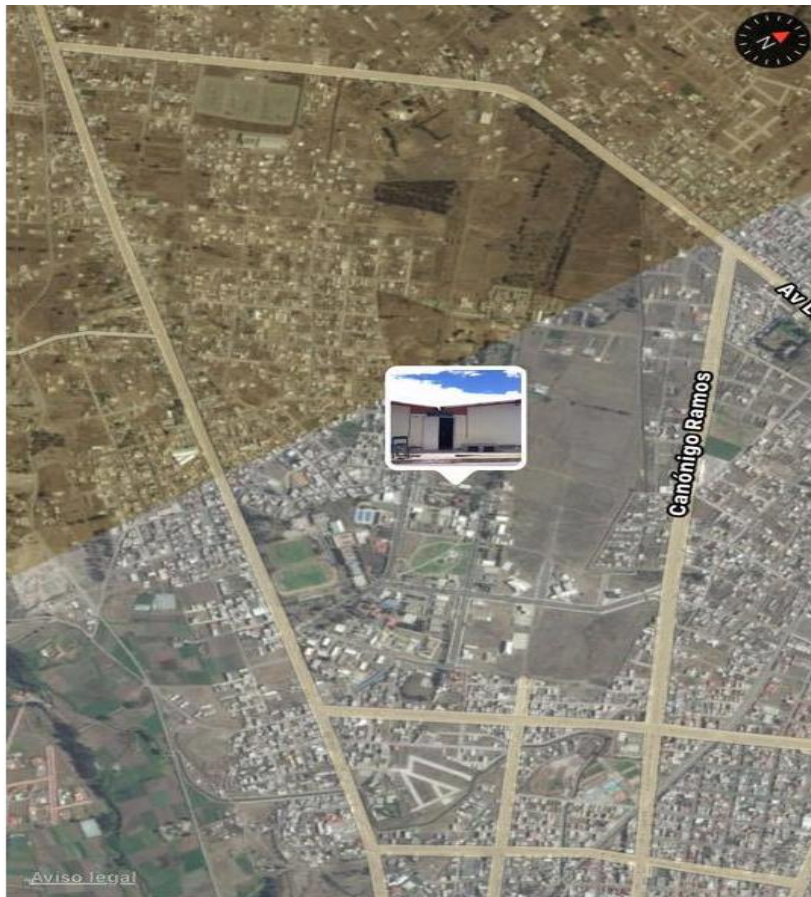


FIGURA 1-3 Localización Geográfica del laboratorio de Procesos

Industriales de la ESPOCH

Fuente: Google Earth.

3.2. Ingeniería del Proyecto

La ingeniería del proyecto inicio con la ejecución de un diagnóstico operativo de la torre de destilación, presentando mayor atención al sistema de condensación de la columna de destilación, para conocer las principales dimensiones física, variables de operación y limitaciones de diseño, las cuales permitieron delimitar las opciones de diseño en los cálculos posteriores. Mediante la definición de las características y variables de operación se procedió, posteriormente, a la delimitación del problema de ingeniería mediante una metodología de diseño establecida dentro de la bibliografía. Dentro de la metodología base el diseño en ingeniería es el proceso de creación de un sistema, componente, o proceso que cumple con las expectativas esperadas. Es un proceso de toma de decisiones (generalmente iterativo), en el que

las ciencias experimentales, la matemática y las ciencias de la ingeniería se combinan para convertir recursos en una forma óptima con el fin de lograr objetivos establecidos. El proceso de diseño de ingeniería conllevó la ejecución de las siguientes etapas.

3.2.1. Terminología

3.2.1.1. Intercambiadores de Calor

En los sistemas mecánicos, químicos, nucleares y otros, ocurre que el calor debe ser transferido de un lugar a otro, o bien, de un fluido a otro. Los intercambiadores de calor son los dispositivos que permiten realizar dicha tarea. Un entendimiento básico de los componentes mecánicos de los intercambiadores de calor es necesario para comprender cómo estos funcionan y operan para un adecuado desempeño. (Kister, 1990, pp. 22-23)

El objetivo de esta sección es presentar los intercambiadores de calor como dispositivos que permiten remover calor de un punto a otro de manera específica en una determinada aplicación. Se presentan los tipos de intercambiadores de calor en función del flujo: flujo paralelo; contraflujo; flujo cruzado. Además, se analizan los tipos de intercambiadores de calor con base en su construcción: tubo y carcasa; placas, y se comparan estos. Se presentan también los intercambiadores de paso simple, de múltiples pasos, intercambiador de calor regenerador e intercambiador de calor no regenerativo. Al final se incluyen algunas de las posibles aplicaciones de los intercambiadores de calor. (Kister, 1990, pp. 22-23)

Como hemos mencionado, un intercambiador de calor es un componente que permite la transferencia de calor de un fluido (líquido o gas) a otro fluido. Entre las principales razones por las que se utilizan los intercambiadores de calor se encuentran las siguientes:

- Calentar un fluido frío mediante un fluido con mayor temperatura.
- Reducir la temperatura de un fluido mediante un fluido con menor temperatura.
- Llevar al punto de ebullición a un fluido mediante un fluido con mayor temperatura.
- Condensar un fluido en estado gaseoso por medio de un fluido frío.
- Llevar al punto de ebullición a un fluido mientras se condensa un fluido gaseoso con mayor temperatura. (Kister, 1990, pp. 23-24)

Debe quedar claro que la función de los intercambiadores de calor es la transferencia de calor, donde los fluidos involucrados deben estar a temperaturas diferentes. Se debe tener en mente que el calor sólo se transfiere en una sola dirección, del fluido con mayor temperatura hacia el fluido de menor temperatura. En los intercambiadores de calor los fluidos utilizados no están en contacto entre ellos, el calor es transferido del fluido con mayor temperatura hacia el de menor temperatura al encontrarse ambos fluidos en contacto térmico con las paredes metálicas que los separan. (Kister, 1990, p. 24)

3.2.1.2. Tipos de intercambiadores de calor según su operación

Ya que los intercambiadores de calor se presentan en muchas formas, tamaños, materiales de manufactura y modelos, estos son categorizados de acuerdo con características comunes. Una de las características comunes que se puede emplear es la dirección relativa que existe entre los dos flujos de fluido. Las tres categorías son: Flujo paralelo, Contraflujo y Flujo cruzado. (Luyben, 2006, pp. 12-13)

3.2.1.3. Flujo paralelo

Existe un flujo paralelo cuando el flujo interno o de los tubos y el flujo externo o de la carcasa ambos fluyen en la misma dirección. En este caso, los dos fluidos entran al intercambiador por el mismo extremo y estos presentan una diferencia de temperatura significativa. Como el calor se transfiere del fluido con mayor temperatura hacia el fluido de menor temperatura, la temperatura de los fluidos se aproxima la una a la otra, es decir que uno disminuye su temperatura y el otro la aumenta tratando de alcanzar el equilibrio térmico entre ellos. Debe quedar claro que el fluido con menor temperatura nunca alcanza la temperatura del fluido más caliente. (Luyben, 2006, p. 13)

3.2.1.4. Contraflujo

Se presenta un contraflujo cuando los dos fluidos fluyen en la misma dirección, pero en sentido opuesto. Cada uno de los fluidos entra al intercambiador por diferentes extremos. Ya que el fluido con menor temperatura sale en contraflujo del intercambiador de calor en el extremo donde entra el fluido con mayor temperatura, la temperatura del fluido más frío se aproximará a la temperatura del fluido de entrada. (GARCÍA, 2013, p. 25)

Este tipo de intercambiador resulta ser más eficiente que los otros dos tipos mencionados anteriormente. En contraste con el intercambiador de calor de flujo paralelo, el intercambiador de contraflujo puede presentar la temperatura más alta en el fluido frío y la más baja temperatura en el fluido caliente una vez realizada la transferencia de calor en el intercambiador (GARCÍA, 2013, pp. 25-26)

3.2.1.5. Flujo cruzado

En el intercambiador de calor de flujo cruzado uno de los fluidos fluye de manera perpendicular al otro fluido, esto es, uno de los fluidos pasa a través de tubos mientras que el otro pasa alrededor de dichos tubos formando un ángulo de 90°. Los intercambiadores de flujo cruzado son comúnmente usados donde uno de los fluidos presenta cambio de fase y por tanto se tiene un fluido pasado por el intercambiador en dos fases bifásico. Un ejemplo típico de este tipo de intercambiador es en los sistemas de condensación de vapor, donde el vapor exhausto que sale de una turbina entra como flujo externo a la carcasa del condensador y el agua fría que fluye por los tubos absorbe el calor del vapor y éste se condensa y forma agua líquida. Se pueden condensar grandes volúmenes de vapor de agua al utilizar este tipo de intercambiador de calor. (DOMÍNGUEZ, 1995, pp. 82-83)

3.2.1.6. Intercambiadores de un solo paso (o paso simple) y de múltiples pasos

Un método que combina las características de dos o más intercambiadores y permite mejorar el desempeño de un intercambiador de calor es tener que pasar los dos fluidos varias veces dentro

de un intercambiador de paso simple. Cuando los fluidos del intercambiador intercambian calor más de una vez, se denomina intercambiador de múltiples pasos. Si el fluido sólo intercambia calor en una sola vez, se denomina intercambiador de calor de paso simple o de un solo paso. Comúnmente el intercambiador de múltiples pasos invierte el sentido del flujo en los tubos al utilizar dobleces en forma de "U" en los extremos, es decir, el doblez en forma de "U" permite al fluido fluir de regreso e incrementar el área de transferencia del intercambiador. Un segundo método para llevar a cabo múltiples pasos es insertar baffles o platos dentro del intercambiador. (DOMÍNGUEZ, 1995, p. 83)

3.2.1.7. Intercambiadores Regenerativos y No-regenerativos

Los intercambiadores de calor también pueden ser clasificados por su función en un sistema particular. Una clasificación común es Intercambiador regenerativo e intercambiador no-regenerativo. Un intercambiador regenerativo es aquel donde se utiliza el mismo fluido (el fluido caliente y el fluido frío es el mismo). Esto es, el fluido caliente abandona el sistema cediendo su calor a un regenerador y posteriormente regresando al sistema. Los intercambiadores regenerativos son comúnmente utilizados en sistemas con temperaturas altas donde una porción del fluido del sistema se remueve del proceso principal y éste es posteriormente integrado al sistema. Ya que el fluido que es removido del proceso principal contiene energía (energía interna, mal llamado calor), el calor del fluido que abandona el sistema se usa para recalentar (regenerar) el fluido de regreso en lugar de expeler calor hacia un medio externo más frío lo que mejora la eficacia del intercambiador. Es importante recordar que el término "regenerativo/no-regenerativo" sólo se refiere a "cómo" funciona el intercambiador de calor en un sistema y no indica el tipo de intercambiador (carcaza y tubo, plato, flujo paralelo, contraflujo). En un intercambiador regenerativo, el fluido con mayor temperatura es enfriado por un fluido de un sistema separado y la energía (calor) removida y no es regresada al sistema. (GARCÍA, 2013, p. 94)

3.2.1.8. Funcionamiento de los intercambiadores de calor

La función general de un intercambiador de calor es transferir calor de un fluido a otro. Los componentes básicos de los intercambiadores se pueden ver como un tubo por donde un flujo de

fluido está pasando mientras que otro fluido fluye alrededor de dicho tubo. Existen por tanto tres intercambios de calor que necesitan ser descritos:

- Transferencia de calor convectiva del fluido hacia la pared interna del tubo
 - Transferencia de calor conductiva a través de la pared del tubo
 - Transferencia de calor convectiva desde la pared externa del tubo hacia el fluido exterior.
- (DUFFUAA, 2000, p. 29)

3.2.1.9. Aplicaciones de los intercambiadores de calor

Los intercambiadores de calor se encuentran en muchos sistemas químicos o mecánicos. Estos sirven, como su nombre lo indica, para ganar calor o expeler calor en determinados procesos. Algunas de las aplicaciones más comunes se encuentran en calentamiento, ventilación, sistemas de acondicionamiento de espacios, radiadores en máquinas de combustión interna, calderas, condensadores, y precalentadores o enfriamiento de fluidos. (DUFFUAA, 2000, p. 30).

3.2.1.10. Recalentador

En sistemas de vapor de gran escala, o en sistemas donde se requieren grandes temperaturas, el fluido de entrada es comúnmente precalentado en etapas, en lugar de tratar de calentar dicho fluido en una sola etapa desde el ambiente hasta la temperatura final. El precalentamiento en etapas incrementa la eficiencia de la planta y minimiza el choque térmico de los componentes, que es el caso de inyectar fluido a temperatura ambiente en una caldera u otro dispositivo operando a alta temperatura. En el caso de sistemas de generación de vapor, una porción del vapor generado es sustraído y utilizado como fuente de calor para recalentar el agua de alimentación en etapas. (Giménez Thomsen, 2007, p. 67-68)

Al entrar el vapor al intercambiador de calor y fluir alrededor de los tubos, éste transfiere su energía térmica y se condensa. Observe que el vapor entra por la parte superior de la carcasa del intercambiador de calor, donde transfiere no solamente el calor sensible (cambio de temperatura) sino también transfiere su calor latente de la vaporización (condensación del vapor

en agua). El vapor condensado entonces sale como líquido en el fondo del intercambiador de calor. (Giménez Thomsen, 2007, p. 90-91)

El agua de alimentación entra al intercambiador de calor en el extremo inferior derecho y fluye por los tubos. Observe que la mayoría de estos tubos estarán debajo del nivel fluido en el lado de la carcasa. Esto significa que el agua de alimentación está expuesta al vapor condensado primero y en seguida viaja a través de los tubos y por detrás alrededor del extremo superior derecho del intercambiador de calor. Después de hacer una vuelta de 180°, entonces el agua de alimentación parcialmente calentada está sujeta a la entrada de vapor más caliente que entra a la carcasa. El agua de alimentación es calentada a mayor temperatura por el vapor caliente y después sale del intercambiador de calor. En este tipo de intercambiador de calor, el nivel fluido del lado de la carcasa es muy importante en la determinación de la eficacia del intercambiador de calor, pues el nivel fluido del lado de la carcasa determina el número de tubos expuestos al vapor caliente. (Giménez Thomsen, 2007, p. 98)

3.2.1.11. Condensadores de vapor

El condensador del vapor, es un componente importante del ciclo del vapor en instalaciones de generación de potencia. Es un recinto cerrado en el cual el vapor sale de la turbina y se fuerza para ceder su calor latente de la vaporización. Es un componente necesario del ciclo del vapor por dos razones. La primera, convierte el vapor usado nuevamente en agua para regresarla al generador o a la caldera de vapor como agua de alimentación. Esto baja el costo operacional de la planta permitiendo reutilizar el agua de alimentación, y resulta más fácil bombear un líquido que el vapor. La segunda razón, aumenta la eficiencia del ciclo permitiendo que el ciclo funcione opere con los gradientes más grandes posibles de temperatura y presión entre la fuente de calor (caldera) y el sumidero de calor (condensador). (María, 2005, p. 69)

Condensando el vapor del extractor de la turbina, la presión del extractor es reducida arriba de la presión atmosférica hasta debajo de la presión atmosférica, incrementando la caída de presión del vapor entre la entrada y la salida de la turbina de vapor. Esta reducción de la presión en el extractor de la turbina, genera más calor por unidad de masa de vapor entregado a la turbina, por conversión de poder mecánico. Ya que ocurre condensación, el calor latente de condensación se usa en lugar del calor latente de vaporización. El calor latente del vapor de la condensación se pasa al agua que atraviesa los tubos del condensador. Después de que el vapor condensa, el líquido saturado continúa transfiriendo calor al agua que se enfría al ir bajando hasta el fondo

del condensador. Algunos grados de subenfriado previenen la cavitación de la bomba. (Shinsky, 1977, pp. 45-46)

3.2.2. Sistema de enfriamiento

La refrigeración mecánica es el proceso mediante el cual se reduce la temperatura de una sustancia por debajo de la que prevalece en su ambiente. La industria de procesos químicos es uno de los usuarios más importante de las instalaciones de refrigeración. Los grandes usuarios típicos de la refrigeración es este campo realizan procesos como la elaboración de hule sintético y textiles, refrigerantes, cloro, plásticos, fluoruro de hidrógeno, intermedios de nafteno, tinturas, tereftalato de dimetilo, acrilonitrilo y caprolactama. (DOMÍNGUEZ, 1995, p. 70)

La refrigeración se emplea para suprimir calor de reacciones químicas, licuar gases de procesos, separar gases por destilación y condensación y purificar productos mediante la congelación de separación selectiva de un componente de una mezcla. La refrigeración se usa también en forma amplia en el acondicionamiento de aire de zonas de plantas industriales, con fines de confort y en aplicaciones asociadas a procesos y al aprovechamiento térmico ambiental. El acondicionamiento de aire es el proceso que consiste en tratar el aire de tal modo que se controlen simultáneamente su temperatura, su humedad, limpieza y distribución para satisfacer los requisitos del espacio acondicionado. (GARCÍA, 2013, p. 55)

El desarrollo y la ampliación de procesos a bajas temperaturas de ha ampliado de una manera impresionante en la última década. La utilización el oxígeno y el nitrógeno líquido en el desarrollo de cohetes y naves espaciales ha generado un aumento increíble en la capacidad de licuefacción y separación del aire. (DOMÍNGUEZ, 1995, pp. 73-74)

3.2.2.1. Enfriamiento Directo

En el cual el fluido de enfriamiento, en este caso el agua fría, va directamente al proceso y regresa como agua caliente a la parte superior (charolas), de la torre de enfriamiento. (Giménez Thomsen, 2007, p. 89)

3.2.2.2. Enfriamiento Indirecto

En este caso el agua fría intercambia calor con un equipo (intercambiador de calor) y regresa como agua caliente a la parte superior de la torre, en el intercambiador de calor el fluido frío pasa por el proceso intercambia calor y regresa al intercambiador como fluido caliente. (DOMÍNGUEZ, 1995, p. 90)

3.2.2.3. Sistema de recirculación cerrado

“El agua circula dentro del sistema y no hay contacto con la atmósfera, en este tipo de sistema no hay perdidas por evaporación, ni por purgado.” (McCabe, 2000, pp. 50-51)

3.2.2.4. Sistema de recirculación abierto

“En este tipo de sistema existe contacto con la atmósfera, por lo que existe perdidas por evaporación y por purgado.” (DOMÍNGUEZ, 1995, p. 91).

3.2.2.5. Por funcionamiento

“Dependiendo del funcionamiento existen cuatro tipos básicos de sistemas de enfriamiento de aguas:

- Aire acondicionado
- Chiller (Enfriamiento rápido)
- Refrigeración
- Torres de enfriamiento”. (González, 1998, p. 36).

3.2.2.6 Enfriador Chiller

El enfriador de agua ó water chiller es una unidad enfriadora de líquidos. En modo bomba de calor también puede servir para calentar ese líquido. El evaporador tiene un tamaño menor que el de los enfriadores de aire, y la circulación del agua se proporciona desde el exterior mediante bombeo mecánico. (Giménez Thomsen, 2007, p. 460).

3.2.3. Diseño del sistema de enfriamiento

3.2.3.1. Delimitación del objetivo del diseño de ingeniería

Entre los elementos fundamentales del proceso de diseño está la formulación de objetivos. El principal objetivo que actuó como directriz dentro de todas las etapas posteriores del diseño se tuvo:

- Diseñar, construir e implementar un sistema de enfriamiento para la torre de destilación que se dispone en el Laboratorio de Procesos Industriales de la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica del Chimborazo.

3.2.3.2. Diseño del tanque de enfriamiento

Lo primero que se debe realizar para el diseño del sistema de refrigeración de la columna de destilación, es calcular las condiciones del tanque que se ajuste a las necesidades de refrigeración, debido a que el proceso va a constituir el manejo de agua, es fundamental que se escoja como material de diseño acero inoxidable para que aumente la vida útil del tanque y también se conoce que la necesidad de líquido refrigerante va a ser 3.84 lt/h y escogiendo un tiempo de operación que oscila 24 horas por operación del equipo se va a diseñar de acuerdo a estas condiciones de operación.

Los tanques de almacenamiento de materias primas y productos de la planta se diseñan según el código API- ASME, para el diseño de tanques que trabajan a presión atmosférica y contienen productos (líquidos o sólidos) en su interior.

- Geometría de los recipientes
 - Recipientes para sólidos: Cabeza: elipsoidal 2:1 Fondo: cónico Carcasa: cilíndrica.
 - Recipientes para líquidos: Cabeza y Fondo: elipsoidal 2:1 Carcasa: cilíndrica. (DOMÍNGUEZ, 1995, p. 335).

Las dimensiones para cada una de las partes vendrán determinadas en función de la altura de la carcasa cilíndrica H son las siguientes proporciones:

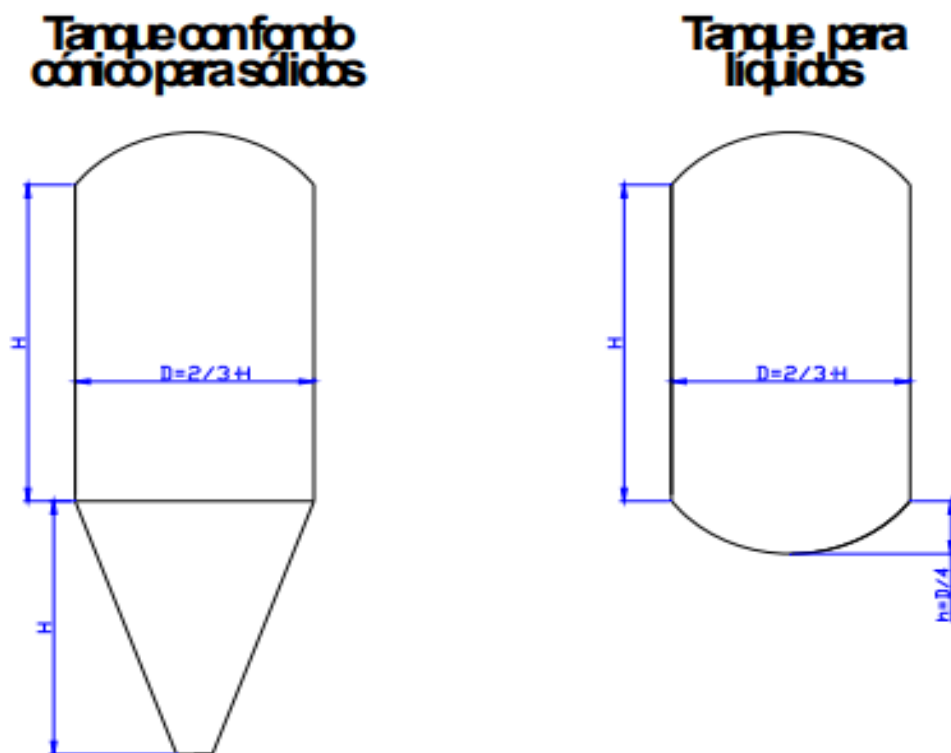


FIGURA 2-3 Dimensiones sugeridas por la norma API- ASME para el diseño de tanques de almacenamiento

Fuente: Domínguez, 1995

❖ **Altura del tanque**

Para la altura del tanque nos enfocamos en el diámetro de nuestro serpentín ya que ese espacio será el prolongado a ocupar para esto calculamos mediante la fórmula:

$$D = \frac{2}{3}H$$

$$H = \frac{3D}{2}$$

$$H = \frac{3 * 40cm}{2}$$

$$H = 60 \text{ cm}$$

La altura del tanque es de 60 cm, se debe aplicar un factor de seguridad, la altura del tanque será 90 cm.

❖ **Volumen del tanque**

El volumen del tanque lo podemos medir, después de obtener la altura y el diámetro, para esto se tiene un volumen total de 60 lts que es el 80% del recipiente, ya que por el factor de seguridad hay que tener en cuenta su capacidad máxima.

3.2.3.3 Diseño de la bomba

Para el uso y empleo de la bomba se da una apreciación, esto se realizó según el caudal que necesitamos transportar y la altura a la cual se debió trasladar, un factor muy importante es el

funcionamiento de la misma durante 24 horas de su uso, para esto necesita una bomba de 0.5 Hp, pero por apreciación del factor de seguridad ocupamos una bomba de 0.75 Hp.

3.2.3.4 Diseño de la unidad de enfriamiento

Para escoger la unidad de enfriamiento se lo hace de acuerdo al calor que deseamos remover, para lo cual escogemos una unidad de $\frac{3}{4}$ de capacidad con refrigerante 404^a.

3.2.3.5. Ventajas tecnológicas de la alternativa 2: Tanque agitado de enfriamiento por contacto directo del agua de condensación.

Dentro de la teoría se disponen de un gran número de sistemas de enfriamiento, no obstante, los sistemas de refrigeración por ciclo de Carnot invertido operan a condiciones, de eficiencia y capacidad, óptimas para la finalidad deseada, en vista a las siguientes ventajas tecnológicas:

- Alta superficie de contacto entre la superficie de enfriamiento y el fluido a enfriar.
- Economía en la construcción.
- Adecuada factibilidad en la construcción e implementación.
- Facilidad en la operación.
- Costos de operación y mantenimiento bajos.

Las características del equipo de refrigeración se describen a continuación:

- Voltaje de operación: 115V
- Frecuencia: 60H
- Refrigerante: 404^a
- Carga: 75g
- Capacidad de congelación: 9 kg de agua en 24h.
- Consumo energético: 336kW/año.

3.2.3.6. Determinación de las corrientes másicas

Para el cálculo de las dimensiones del intercambiador de calor se procedió en primer lugar a la determinación de la corriente de vapor generada dentro de la cámara de destilación, en vista a que dicha masa deberá ser enfriada por el sistema de enfriamiento. Para la cuantificación de la corriente de vapor se partió del balance general de masa, obteniéndose como principal resultado que el vapor generado, valorado por medio del análisis de operación de la torre de destilación, es igual a 0.164 kg/h.

3.2.3.7. Cinética de transferencia de calor

Para la formulación del balance de energía general del sistema, considerando que la única corriente energética presente dentro del sistema está representada por la transferencia de calor del fluido caliente al fluido frío a través de la pared del tubo interno, se partió de las siguientes ecuaciones:

➤ **Cantidad de calor removida del fluido caliente**

$$q = C_h(T_1 - T_2)$$

➤ **Cantidad de calor adicionada al fluido frío**

$$q = C_c(t_2 - t_1)$$

Conociendo que el calor, tanto removido del fluido caliente como el calor adicionado al fluido frío, presentan el mismo valor las ecuaciones antes descritas se igualan al siguiente término

$$C_h(T_1 - T_2) = C_c(t_2 - t_1)$$

La expresión anterior representa las condiciones de entrada y salida de los fluidos calientes y frío, considerando que no existen pérdidas de calor al exterior de la chaqueta del intercambiador de calor.

3.2.3.8. Calor removido para el enfriamiento

Para la determinación de la cantidad de calor que debe ser removida del fluido caliente, para disminuir la temperatura del fluido desde 348°K hasta los 305°k, principal variable que establece la operación del sistema de enfriamiento, se partió de la siguiente ecuación:

$$q = \dot{D}C_h(T_1 - T_2) + \dot{D}l_{mezcla}$$

Que representa la cantidad de calor removido para bajar la temperatura del fluido caliente (calor latente) y la cantidad de calor removido para la transformación de estado (calor sensible). Para la determinación del calor latente de la mezcla l_{mezcla} se aplicó la siguiente relación matemática, considerando que el calor latente es una propiedad agregativa.

$$l_{mezcla} = X_{H_2O} * l_{H_2O} + X_{OH} * l_{OH}$$

Tabla 3- 1 Datos para el calor removido

Variable/constante	Valor
l_{H_2O}	$8,41 \times 10^2 \text{ kJ} / \text{kg} * ^\circ K$
l_{OH}	$846 \text{ kJ} / \text{kg} * ^\circ K$

Realizado Por: Moreno, A y Toscano, C. 2017.

Conociendo los términos de la ecuación descrita en base al balance de masa y datos tabulados se obtuvo que el calor latente de la mezcla es igual a:

$$l_{mezcla} = 1.88 * 10^6 J / Kg$$

Por lo tanto, el calor total que debe ser removido desde el fluido frio hasta alcanzar una temperatura ambiente es igual a:

$$q = \dot{D}C_h(T_1 - T_2) + \dot{D}l_{mezcla}$$

$$q = 93,84 \text{ watt}$$

Tabla 4-3 Datos para el calor removido

Variable/constante	Valor
C_h	$4,186 \text{ KJ} / \text{Kg} * ^\circ\text{K}$
T_1	348°K
T_2	305°k
\dot{D}	$0,164 \text{ kg} / \text{h}$
l_{mezcla}	$1,88 * 10^6 \text{ J} / \text{Kg}$

Realizado Por: Moreno, A y Toscano, C. 2017.

3.2.3.9. Determinación de la capacidad de remoción de calor del equipo de refrigeración

Para la determinación de la capacidad de remoción de calor del equipo se partió de las especificaciones técnicas de la unidad $\frac{3}{4}$ de la cual se obtuvieron todos los componentes, específicamente de la capacidad de congelación, la cual representa la cantidad, en kg, que es capaz de congelar una cantidad de agua en un lapso de tiempo igual a 24 h, por lo cual se partió de la siguiente ecuación:

$$Q_{congelacion} = Q_{lcongelacion} + Q_{Srefrigeracion}$$

Donde:

$$Q_{congelacion} = m_{congelacion} * l_{congelacion} + m_{congelacion} Cp(T_1 - T_2)_{congelacion}$$

Considerando que la capacidad de congelación del refrigerador es 9 kg/24horas y que la temperatura de congelación del agua es 0° C se obtiene.

$$Q_{congelacion} = m_{congelacion} * l_{congelacion} + m_{congelacion} Cp(T_1 - T_2)_{congelacion}$$

$$Q_{congelacion} = 222,57 \text{ kJ/h} \text{ ó } 61,83 \text{ watt}$$

Tabla 2-3 Datos para la capacidad de calor de remoción.

Variable/constante	Valor
$m_{congelacion}$	$9 \text{ Kg}/24\text{h}$ ó $0,375 \text{ Kg}/\text{h}$
$l_{congelacion}$	$334 \text{ KJ}/\text{Kg}$
Cp	$4,186 \text{ KJ}/\text{Kg} * ^\circ\text{K}$
T_1	348°K
T_2	286°k

Realizado Por: Moreno, A y Toscano, C. 2017.

3.2.3.10. Determinación del caudal máximo a refrigerar

En vista a que el equipo de refrigeración puede extraer como máximo un flujo de calor igual a 222,57 kJ/h, se determinó el caudal máximo a refrigerar, en base a la siguiente ecuación:

$$Q_{Srefrigeracion} = \dot{m}_{refrigeracion} * C_{prefrigeracion} * (T_1 - T_2)_{refrigeracion}$$

$$\dot{m}_{refrigeracion} = \frac{Q_{Srefrigeracion}}{C_{prefrigeracion} * (T_1 - T_2)_{refrigeracion}}$$

Considerando que se desea refrigerar el agua para condensación hasta los 4°C (en vista a que ha dicho valor la densidad del agua es la máxima), se obtiene:

$$\dot{m}_{refrigeracion} = \frac{Q_{Srefrigeracion}}{C_{prefrigeracion} * (T_1 - T_2)_{refrigeracion}}$$

$$\dot{m}_{refrigeracion} = 5,91 \text{ kg/h}$$

Tabla 6-3 Datos para el caudal máximo a refrigerar.

Variable/constante	Valor
$Q_{Srefrigeracion}$	61,83 watt ó 222,57 kJ/h
$C_{prefrigeracion}$	4,186 $\text{KJ/Kg} * ^\circ\text{K}$
$(T_1 - T_2)_{refrigeracion}$	9°K

Realizado Por: Moreno, A y Toscano, C. 2017.

3.2.3.11. Dimensionamiento del sistema de enfriamiento

Considerando que se utilizará una espiral de cobre para la transferencia de calor entre el refrigerante, al interior de la espiral, y el agua para condensación en el exterior de la espiral, se puede considerar a la geometría de la espiral como un tubo hueco de cobre en forma de hélice. Para determinar las dimensiones de la espiral se partió de un análisis de la cinética del calor, la cual se describe por medio de la siguiente ecuación:

$$q = U_h \eta_h S_h \Theta_m$$

En vista a que se requiere determinar las dimensiones del sistema de enfriamiento (principalmente el largo de la espiral) la ecuación se estableció en función de la superficie de la espiral, obteniéndose la siguiente relación matemática:

$$S_h = \frac{q}{U_h \eta_h \Theta_m}$$

U_h = coeficiente de transferencia de calor global

η_h = coeficiente que mide la eficiencia en el intercambio de calor

S_h = superficie de contacto

Θ_m = diferencia de temperaturas entre las dos superficies o fluidos

Posteriormente se realizó la determinación de la resistencia térmica total debida al camino que recorre el calor para ser transferido desde el agua para condensación al refrigerante, en base a la siguiente relación matemática:

$$R = R_h + R_{dh} + R_m + R_{dh} + R_c$$

Para la determinación del coeficiente de transferencia de calor global (el cual es el inverso de la resistencia térmica total) se verifico todos los mecanismos de transferencia con que el calor logra ser transportado desde el agua de enfriamiento, por medio de la capa convectiva en el fluido caliente, a través de la pared del tubo (espiral) y por medio de la capa convectiva en el

refrigerante, hasta llegar al punto final que está conformado por el refrigerante, en base a las siguientes relaciones matemáticas:

- Convención en el interior de la espiral

$$R_h = \frac{1}{h_h}$$

Resistencias debido a la convección en el cuerpo caliente

- Resistencia generada por la suciedad en el interior de la espiral

$$R_{dh} = \frac{1}{h_{dh}}$$

Suciedades o imperfecciones debido a la superficie de contacto

- Conducción a través de las paredes de la espiral

$$R_m = \frac{\ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)}{2\pi k_m L n_t}$$

Resistencia debido al material

- Resistencia generada por la suciedad en el exterior de la espiral

$$R_{dh} = \frac{1}{h_{dc}}$$

Ensuciamientos que existen en la pared del hemisferio frío.

- Convección en el exterior de la espiral

$$R_c = \frac{1}{h_c}$$

Resistencia debido a la transferencia de calor convectiva

Conociendo que el coeficiente de transferencia global es el recíproco de la resistencia total se obtuvo:

$$U = \frac{1}{R}$$

$$U = \frac{1}{R_h + R_{dh} + R_m + R_{dh} + R_c}$$

Conociendo la relación de cálculo de las resistencias térmicas el coeficiente de transferencia de calor global resulto:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_h} + \frac{1}{h_{dh}} + \frac{\ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)}{2\pi k_m L n_t} + \frac{1}{h_{dc}} + \frac{1}{h_c}}$$

Considerando que el espesor del tubo que conforma la espiral (es decir el camino que debe recorrer el calor a través del tubo) y el coeficiente de conducción térmica para el material del cual está compuesto (cobre) es muy alto, se puede despreciar el valor de la resistencia térmica de la conducción a través del tubo, obteniéndose la siguiente relación:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_h} + \frac{1}{h_{dh}} + \frac{1}{h_{dc}} + \frac{1}{h_c}}$$

Considerando además que los fluidos a ser con que se opera (agua de condensación y refrigerante) no producen ensuciamiento, se puede despreciar los términos referentes a la resistencia por el ensuciamiento en las capas interior y exterior de la espiral, obteniéndose la siguiente relación:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_h} + \frac{1}{h_c}}$$

Para factibilidad de cálculo por medio de factorización la ecuación se reordeno a las siguientes relaciones matemáticas:

$$U = \frac{h_h h_c}{h_c + h_h}$$

En vista a que se dispone de las expresiones para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor y considerando una eficiencia térmica del 80% (es decir el termino η_h toma un valor igual a 0.8), la ecuación de la superficie de la capa caliente se transforma a la siguiente expresión

$$S_h = \frac{q}{U_h \eta_h \Theta_m}$$

$$S_h = \frac{q}{\frac{h_h h_c}{h_c + h_h} \eta_h \Theta_m}$$

La convección en ambas capas será de carácter forzado, en vista a que dentro de la espiral fluye forzadamente el refrigerante impulsado por el compresor del sistema de refrigeración, en tanto que el agua para condensación circula forzadamente debido a la acción de la bomba. Conociendo que el coeficiente de convección para el refrigerante (vapor por convección forzada) tiene un valor igual a $20 \text{ Watt}/(\text{m}^2 \cdot \text{°K})$, y que el valor del coeficiente de convección para el agua (agua por convección forzada) es igual a $300 \text{ Watt}/(\text{m}^2 \cdot \text{°K})$ se obtuvo que el valor de la capa fría es igual a:

$$S_h = \frac{q}{\frac{h_h h_c}{h_c + h_h} \eta_h \Theta_m}$$

$$S_h = 0.096 \text{ m}^2$$

Tabla 3-3 Datos para la superficie de la capa

Variable/constante	Valor
q	61,83 watt
η_h	0,8
h_h	$20 \text{ Watt}/\text{m}^2 \cdot \text{°K}$
h_c	$300 \text{ Watt}/\text{m}^2 \cdot \text{°K}$
Θ_m	43°K

Realizado Por: Moreno, A y Toscano, C. 2017.

Considerando un factor de seguridad igual a 2, para evitar sobrepresión dentro del tubo interno, la superficie de la capa caliente es igual a:

$$S_h = 0,192 \text{ m}^2$$

Conociendo que la espiral estará construida por un tubo de cobre en forma de hélice, para determinar la geometría de la capa donde se produce la transferencia de calor se parte de la siguiente ecuación:

$$S_h = \pi d_i L$$

Considerando que comercialmente se dispone de tubos de cobre de un diámetro para refrigeración de 12 mm se obtiene que el largo del tubo que conforma el espiral en base a la siguiente relación:

$$S_h = \pi d_i L$$

$$L = 5,09m$$

Tabla 8-3 Datos para la longitud del tubo

Variable/constante	Valor
S_h	0,192 m
d_i	0,012 m
π	3,1416

Realizado Por: Moreno, A y Toscano, C. 2017.

Para estructurar la espiral se considera, por facilidad de construcción y disponibilidad de espacio para la implementación, los siguientes restrictivos en el cálculo:

- Alto de la espiral: máximo 60 m
- Numero de giros: máximo 8

Para determinar el paso, es decir la distancia entre cada giro de la hélice, se partió de la siguiente relación:

$$paso = \frac{H_{espiral}}{N_{giros}}$$

Conociendo que como máximo se puede alcanzar una altura de 1m y que se puede realizar como máximo 7 giros (para evitar rupturas del tubo), se obtiene que el paso es igual a:

$$paso = 0.075 \text{ m}$$

Para determinar la longitud de la circunferencia de cada giro se aplicó la siguiente relación:

$$L_{giro} = \frac{L_{tubo}}{N_{giros}}$$

Conociendo que la longitud del tubo debe ser igual a 5,09 m y que el número de giros como máximo puede ser igual a 8 se obtuvo:

$$L_{giro} = 0,64 \text{ m}$$

Para determinar el diámetro de la hélice se partió de la siguiente expresión de carácter matemático:

$$L_{giro} = \pi * D_{elice}$$

Habiendo determinado previamente el largo de la circunferencia de cada giro se obtuvo:

$$D_{elice} = 0.20 \text{ m}$$

Para la determinación del ángulo de inclinación de la espiral se partió de la siguiente expresión:

$$\tan \alpha = \frac{\textit{paso}}{D_{elice}}$$

Conociendo los términos de la expresión se obtuvo que el ángulo de inclinación de la espiral es igual a:

$$\alpha = 20,5^\circ$$

3.2.4. Tabla de Resultados

Tabla 4-3 Resultados del dimensionamiento del sistema de enfriamiento alternativa 2.

PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD
Volumen del Refrigerante	$V_{refrigerante}$	3.84	Lt/h
Factor de seguridad	F	2	–
Altura del tanque	H	90	Cm
Volumen del tanque	V	60	lts
Calor Removido	q	93.84	watt
Ángulo de Inclinación	α	20.5	°
Valor capa Fría	S_h	0.192	m^2
Diámetro de Chaqueta	d_0	0.40	m
Diámetro interno	d_i	0.012	m
Largo máximo del Sistema	L	0.9	m
Calor latente de la mezcla	L_{mezcla}	1.88×10^6	J/kg
Capacidad de Remoción	$Q_{congelacion}$	222.57	kJ/h
Caudal máximo	$Q_{srefrigeracion}$	145.77	kJ/h
Superficie Capa Caliente	S_h	0.192	m^2
Largo del Tubo	L	5.09	m
Longitud de Circunferencia	L_{giro}	0.64	m
Diámetro de Hélice	D_{elice}	0.20	m

Realizado Por: Moreno, A y Toscano, C. 2017.

3.2.5. Validación del equipo.

3.2.5.1 Cálculos reales tomados durante la validación del equipo

❖ Cantidad de agua real utilizada

$$W = \frac{W_{\text{litros}} * \rho}{t}$$

$$W = \frac{0,056 * 998}{45}$$

$$W = 1,24 \frac{Kg}{h}$$

❖ Cantidad de alcohol real destilado

$$F = W - D$$

$$D = 1,31 - 1,24$$

$$D = 0,07 \frac{Kg}{h}$$

❖ **Cálculo del balance energía en el condensador**

- **Cálculo de la capacidad calorífica media**

$$\bar{C}_p = \sum_{Cp=1}^{Cp=1} x_i * C_{pi}$$

$$\bar{C}_p = (0.20)(2460) + (0.80)(4186)$$

$$\bar{C}_p = 3840,8 \frac{J}{Kg^{\circ}C}$$

$$\bar{C}_p = 0,918 \frac{KCal}{Kg^{\circ}C}$$

- **Cálculo de la masa de mezcla alimentada a la torre**

$$\dot{Q}_{gana\ el\ agua} = -\dot{Q}_{pierde\ la\ mezcla}$$

$$\dot{m}_{agua} * C_{p\ agua} * (T_2 - T_1) = \dot{m}_{mezcla} * C_{p\ mezcla} * (T_{p2} - T_{p1})$$

$$\frac{\dot{m}_{agua} * C_{p\ agua} * (T_2 - T_1)}{C_{p\ mezcla} * (T_{p2} - T_{p1})} = -\dot{m}_{mezcla}$$

$$\frac{0.622 * 1,001 * (14 - 4)}{0.918 * (17 - 75)} = -\dot{m}_{mezcla}$$

$$\dot{m}_{mezcla} = - 0,116 \text{ Kg/h}$$

❖ **Cálculo de la entalpia de alimentación**

$$H_F = \dot{m}_{inicial\ mezcla} * \bar{C}_p * \Delta T$$

$$H_F = 0.33 * 0.918 * (75 - 18)$$

$$H_F = 17,26 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

❖ **Cálculo de la entalpia de destilado**

$$H_D = \dot{m}_{mezcla\ final} * \bar{C}_p * \Delta T$$

$$H_D = 0.33 * 0.918 * (75 - 17)$$

$$H_D = 17,57 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

❖ **Cálculo del calor latente de la mezcla en el destilado**

$$l_{mezcla} = X_{H_2O} * l_{H_2O} + X_{OH} * l_{OH}$$

$$l_{mezcla} = 0.80 * (2260 \times 10^3) + 0.20 * (846 \times 10^3)$$

$$l_{mezcla} = 1,88 * 10^6 \text{ J/kg}$$

❖ **Cálculo del calor desprendido en el destilado**

$$q = \dot{D}C_h(T_1 - T_2) + \dot{D}l_{mezcla}$$

$$q = 0,07 * 4186 (348 - 290) + 0,07(1,88 * 10^6)$$

$$q = 148595 \frac{\text{J}}{\text{h}} * \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}$$

$$q = 41,28 \text{ watt}$$

3.2.5.2. Comparación de las variables obtenidas mediante cálculos de ingeniería vs. Datos reales obtenidos en el laboratorio

El objetivo principal que se busca con la validación de los datos, es comparar que tanto se ajustan a la realidad lo calculado mediante técnicas de balance de masa y energía, por lo que esta comparación resulta importante para calcular que tan próximo están los datos de diseño para la realidad de funcionamiento del equipo, en la tabla 9-3, se muestra la comparación de los datos obtenidos en la cabeza de la torre, con lo cual se comparan todos los factores obtenidos para el destilado del proceso, además de que las variables más relevantes para la comparación serán la cantidad de masa destilada y el calor desprendido por el mismo ya que de estas dos variables dependerá el cálculo y las otras variables que se muestran en la comparación afectan directamente a la masa y al calor obtenido, tanto en datos calculados es decir sin el sistema de enfriamiento y en datos reales obtenidos al implementar el sistema de enfriamiento, esta comparación se mostrara en el gráfico 1-3 y gráfico 2-3.

Tabla 10-3 Comparación de las variables obtenidas mediante cálculos de ingeniería vs. Datos reales obtenidos en el laboratorio

Variable/constante	Valor Calculado	Valor real
C_h	$4,186 \text{ KJ}/\text{Kg} * ^\circ\text{K}$	$3.8476692 \text{ KJ}/\text{Kg} * ^\circ\text{K}$
T_1	348°K	348°K
T_2	305° k	293°K
\dot{D}	$0,164 \text{ kg}/\text{h}$	$0.07 \text{ kg}/\text{h}$
l_{mezcla}	$1,88 * 10^6 \text{ J}/\text{Kg}$	$845 \text{ J}/\text{kg}$
q	93.48watt	41.28 watt

Realizado Por: Moreno, A y Toscano, C. 2017.

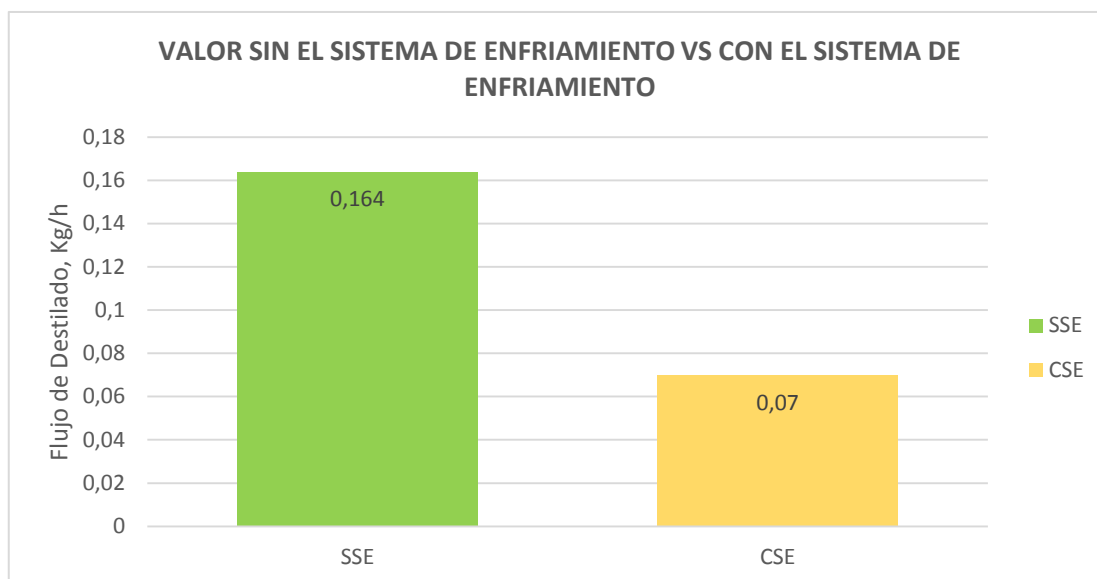


GRÁFICO 1-3 Comparación del flujo de destilado en datos sin el sistema de enfriamiento vs. Datos reales tomados con el sistema de enfriamiento en la prueba de laboratorio.

Realizado Por: Moreno, A y Toscano, C. 2017.

Como se muestra en el gráfico 1-3, la masa de destilado calculado al obtener los datos reales fue inferior en la práctica de laboratorio con el sistema de enfriamiento, lo que nos indica que hay eficiencia en el destilado ya que se obtiene menor flujo y mayor eficiencia de grado alcohólico, esto se da por los ajustes teóricos que se hacen para la obtención de la masa ya que se trabaja con datos ideales, mientras que en la práctica no se cumple con estos datos ideales sino son reales y existen diversos factores que afectan a la operación normal de la torre de destilación. Esto influirá notoriamente en la cantidad de calor extraído al flujo de destilado, ya que al existir un mayor flujo más difícil será la remoción de calor, y se necesitara mayor cantidad de agua de refrigeración para remover el calor, estos datos se ajustan a lo que se muestra en la gráfico 2-3, en donde el calor removido calculado mediante balances de energía de manera teórica es mayor al calor removido en la práctica, esto nos indica que el calor removido al implementar el sistema de enfriamiento se tiene una reducción de costos con lo que se ahorra un 43 % de energía a remover y se da la eficiencia del equipo.

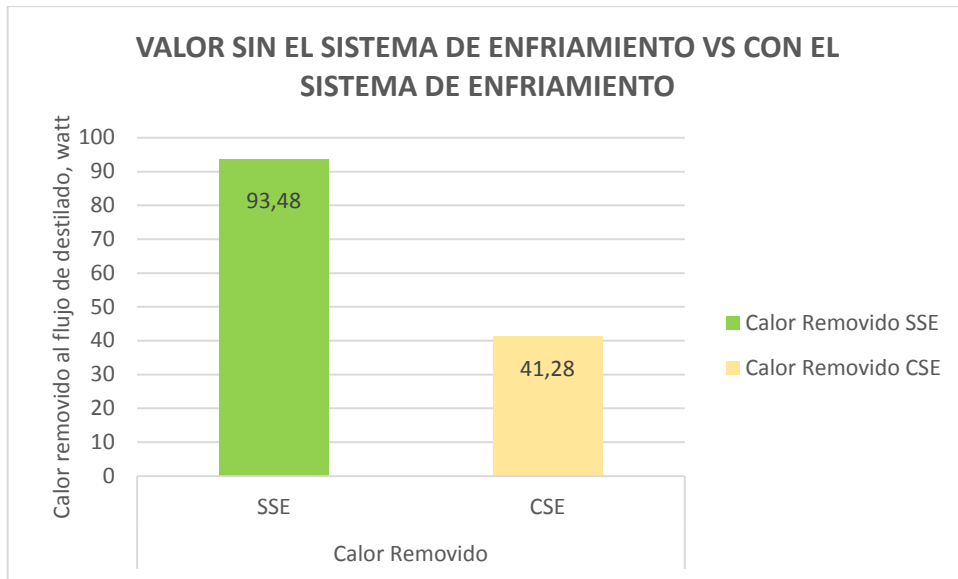


GRÁFICO 2-3 Comparación del calor removido al flujo de destilado en datos sin el sistema de enfriamiento vs. Datos reales tomados con el sistema de enfriamiento.

Realizado Por: Moreno, A y Toscano, C. 2017

3.2.5.9. Determinación de la capacidad de remoción de calor del equipo de refrigeración

$$Q_{congelacion} = Q_{lcongelacion} + Q_{Srefrigeracion}$$

Donde:

$$Q_{congelacion} = m_{congelacion} * l_{congelacion} + m_{congelacion} Cp(T_1 - T_2)_{congelacion}$$

Considerando que la capacidad de congelación del refrigerador es 9 kg/24 horas y que la temperatura de congelación del agua es 0°C se obtiene

$$Q_{congelacion} = m_{congelacion} * l_{congelacion} + m_{congelacion} Cp(T_1 - T_2)_{congelacion}$$

$$Q_{congelacion} = 0,375 * (334) + 0.375 * 4,186(348 - 277)$$

$$Q_{congelacion} = 236,7 \frac{KJ}{h} * \frac{1 h}{3600 s}$$

$$Q_{congelacion} = 65,75 \text{ watt}$$

3.2.5.10. Determinación del caudal máximo a refrigerar

En vista a que el equipo de refrigeración puede extraer como máximo un flujo de calor igual ha $236,7 \frac{KJ}{h}$, se determinó el caudal máximo a refrigerar, en base a la siguiente ecuación:

$$Q_{Scongelación} = \dot{m}_{refrigeracion} * C_{p_{refrigeracion}} * (T_1 - T_2)_{refrigeracion}$$

$$\dot{m}_{refrigeracion} = \frac{Q_{Scongelación}}{C_{p_{refrigeración}} * (T_1 - T_2)_{refrigeracion}}$$

Considerando que se desea refrigerar el agua para condensación hasta los 4°C (en vista a que ha dicho valor la densidad del agua es la máxima), se obtiene:

$$\dot{m}_{refrigeracion} = \frac{236,7}{4,186 * (287 - 277)}$$

$$\dot{m}_{refrigeracion} = 5,65 \text{ kg/h}$$

De acuerdo con los datos obtenidos en los datos reales en comparación con los datos obtenidos mediante cálculos, lo que se observa en la tabla 11-3, indica el dimensionamiento que se utilizó mediante cálculos vs. los datos que se obtuvo en el laboratorio y con lo cual se comprobó si el sistema estuvo dimensionado de acuerdo a las características y técnicas y a la capacidad de la torre de destilación para lograr un óptimo enfriamiento en la cabeza de la torre de destilación.

Tabla 11-3 Comparación de las variables obtenidas mediante cálculos de ingeniería sin el sistema de enfriamiento vs. datos reales obtenidos en el laboratorio con el sistema de enfriamiento.

Variable/constante	Valor Calculado	Valor Real
$Q_{Srefrigeracion}$	61,83 watt ó 222,57 kJ/h	236,7 kJ/h ó 65,75 watt
$Cp_{refrigeracion}$	4,186 $\text{KJ/Kg} \cdot \text{°K}$	4,186 $\text{KJ/Kg} \cdot \text{°K}$
$(T_1 - T_2)_{refrigeracion}$	9°K	9°K
$\dot{m}_{refrigeracion}$	5,91 kg/h	5,65 kg/h

Realizado Por: Moreno, A y Toscano, C. 2017.

Con estos datos obtenidos se considera comparar la masa de refrigeración calculada vs. la masa real de refrigeración, ya que esto es el factor que afectara directamente a las demás variables evaluadas en la refrigeración del destilado, la importancia de la refrigeración radica en que a mejor refrigeración se mejora el rendimiento de la operación en la torre de destilación, por lo cual es fundamental que el diseño cumpla con todos los parámetros preestablecidos en las

normas y además que al lograr la refrigeración óptima del flujo de destilado se aumentará la cantidad de destilado obtenido y se reducirá las pérdidas en la torre.

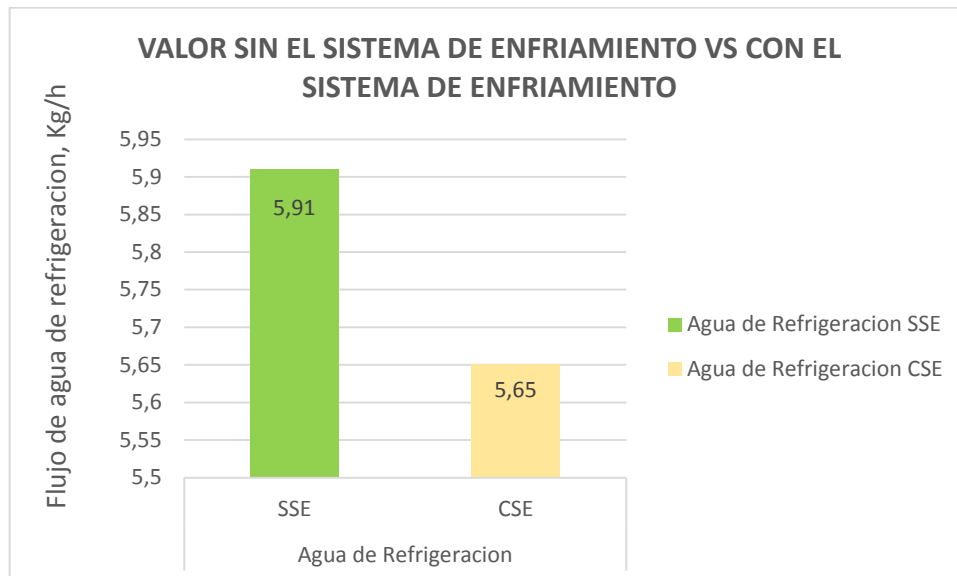


GRÁFICO 3- 1 Gráfico Comparación del flujo de agua de refrigeración en datos calculados por métodos de ingeniería vs. Datos reales tomados.

Realizado Por: Moreno, A y Toscano, C. 2017.

De acuerdo con los datos reportados en la gráfico 3- 2, se indica que el flujo calculado es mayor al flujo obtenido después del sistema de enfriamiento lo que nos indica es la cantidad de agua para remover en el equipo de refrigeración, es decir se tiene un ahorro energético.

3.2.6. Análisis de costo

3.2.6.1. Costos de inversión

❖ Recursos materiales

Tabla 12-3 Tanque de almacenamiento

Denominación	Cantidad	Costo de construcción \$
Tol de acero inoxidable mate sanitario	2,13 m ²	285
Poliuretano dos componentes	0,053 m ³	120
Suelda tig	1	60
Suelda de plata al 5%	1	20
	TOTAL	485

Realizado Por: Moreno, A y Toscano, C. 2017.

Tabla 13-3 Accesorios

Denominación	Cantidad	Costo
Filtro deshidratador ¼ de tuerca	1	25
Control de frio	1	90
Tubería de cobre 12 mm	3,28 m	75
Tubería de cobre 5 mm	2,15 m	30
Válvula de expansión	1	85
Tubería ¾	3 m	3,04
Codos ¾	7	4,20
Te ¾	1	1,10
Válvula de pie ¾	1	7,02

Buchin $\frac{3}{4}$	1	1,60
Rollo teflón	2	2,20
Llaves de paso $\frac{3}{4}$ de bola	2	14,04
Llave universal $\frac{3}{4}$	1	2,40
Adaptadores $\frac{1}{2}$	2	0,80
Reducciones $\frac{3}{4}$ a $\frac{1}{2}$	3	2,20
Manguera $\frac{1}{2}$	8,5 m	7,50
Enchufe	1	1,00
Abrazaderas $\frac{1}{2}$	2	0,60
Abrazaderas $\frac{3}{4}$	2	1,00
Contactador LS S/BOBINA 18AMP	2	21,75
bobina LS PARA MC9/12/18/22 220VAC	2	12,19
relé térmico LS MT-32 12-18AMP	1	23,07
relé térmico LS MT-32 5-8AMP	1	23,07
pulsador luminoso 22MM 220V VERDE	2	5,52
pulsador luminoso 22MM 220V ROJO	2	5,52
Gabinete metálico liviano 400X300X200	1	24,07
Riel DIM	1	1,97
Breaker LS riel DIM 1 poli 2AMP	2	10,08
Cable concéntrico SJT 600V 3X10AWG incable	5	10,83
Plastic stretch	1	11,95
	TOTAL	503,72

Tabla 14-3 Equipos

Unidad ¾	1	430
Bomba	1	122,65
	TOTAL	552,65

Realizado Por: Moreno, A y Toscano, C. 2017.

Tabla 5-3 Químicos

Refrigerante R404a	1	120
	TOTAL	200

Realizado Por: Moreno, A y Toscano, C. 2017.

❖ **Recursos Humanos**

Tabla 6-3 Mano de obra

Mano de obra	300	
	TOTAL	300

Realizado Por: Moreno, A y Toscano, C. 2017

❖ **Costos operativos**

Tabla 7-3 Transporte

Movilización		250
Trasporte del equipo	2	180
	TOTAL	430

Realizado Por: Moreno, A y Toscano, C. 2017.

Tabla 8-3 Alimentación

Alcohol a 60 GL	60 lts	180
Agua	0,060 m ³	10
	TOTAL	190

Realizado Por: Moreno, A y Toscano, C. 2017.

❖ **Recursos Totales**

Tabla 9-3 Recursos totales

ACTIVIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	TOTAL (\$)
Recursos materiales	-	-	1741,37
Recursos Humanos	-	-	300,00
Costos de operativos	-	-	620,00
	TOTAL		2661,37

Realizado Por: Moreno, A y Toscano, C. 2017.

3.2.7. Análisis y discusión de resultados

Tabla 20-3 Análisis de los resultados en la validación VS sin la implementación del sistema de enfriamiento.

Sin el sistema de enfriamiento			Con el sistema de enfriamiento		
Variable	Valor	Unidad	Variable	Valor	Unidad
Q	337,824	kJ/h	q	148,595	kJ/h
$q_{Srefrigeracion}$	222,57	kJ/h	$q_{Srefrigeracion}$	236,7	kJ/h
$\dot{m}_{refrigeracion}$	5,91	Kg/h	$\dot{m}_{refrigeracion}$	5,65	Kg/h
\dot{D}	0.164	Kg/h	\dot{D}	0.07	Kg/h
t	72	H	t	44	H

Realizado Por: Moreno, A y Toscano, C. 2017.

Al realizar la investigación en el laboratorio de Procesos Industriales para la obtención de alcohol de alta concentración en la torre de destilación se inició con una alimentación de un alcohol a 30 °G y al llegar a una temperatura de 75° C en la columna de destilación el destilado pasa a los condensadores en los cuales al implementar el sistema de enfriamiento se tiene un cambio de temperatura para que se produzca el cambio de fase de (18-75) °C llegando a un grado alcohólico de 95° G, Al llegar a obtener dicho grado alcohólico se mejora la eficiencia de la torre.

Para llegar a un mayor grado alcohólico hay que solucionar el limitante de diseño de la chaqueta del tanque de alimentación que causa que la transferencia de calor no sea la adecuada, para esto en la sección de destilación se debe mejorar el rendimiento del equipo dando así un grado alcohólico como máximo para su condensación.

Con el sistema de enfriamiento se obtuvo un grado alcohólico de 95°GL teniendo una remoción de calor en la condensación de 148,595 kJ/h con un tiempo de operación de 44 horas, aumentando la eficiencia en la destilación al 63% con un rendimiento del equipo de 33%, antes de implementar el sistema de enfriamiento el alcohol resultante de la destilación llega alrededor de 85°G con un tiempo de operación de 72 horas, con una eficiencia en la destilación de 34% y el rendimiento del equipo de 33%.

Esto nos indica que mediante los cálculos las variables obtenidas al comparar con los valores iniciales nos aportan una disminución de tiempo, flujos y cantidades de calor a remover con lo cual se produjo un ahorro energético de 43% que da mayor eficiencia a la destilación.

CONCLUSIONES

- Se realizó un análisis de las condiciones iniciales para la torre de destilación, obteniendo las siguientes variables q : 93,84 W; \dot{D} : 0,164 Kg/h con un tiempo de operación de 72 h.
- Se obtuvo un flujo de destilado de 0,07 Kg/h con grado alcohólico de 95°GL.
- Las variables de operación para el sistema de enfriamiento de la torre de destilación son la masa de refrigeración igual a 5,65 Kg/h, el cambio de temperatura para que se produzca el cambio de fase siendo (18-75) °C y la cantidad de calor removida por condensación del refrigerante 148,595 kJ/h.
- Las dimensiones calculadas del sistema de enfriamiento son: Área Superficial de transferencia de calor: 0,192 m^2 ; \varnothing_i : 0,012 m y longitud del sistema refrigerante: 5,09 m; Capacidad del tanque: 60 L/h; Altura del tanque: 90 cm; Bomba: 0.75 Hp; Unidad de Enfriamiento: 0.75 Hp.
- Al realizar la validación del equipo mediante la operación de destilación de alcohol artesanal se obtuvo un alcohol de 95 °GL, lo que indica un aumento en la eficiencia del equipo de 63% y rendimiento del 33%.

RECOMENDACIONES

- Verificar que el flujo de líquido refrigerante sea constante en la operación del equipo, para mejorar el enfriamiento del destilado y obtener un rendimiento satisfactorio en la operación del equipo.
- Verificar que las válvulas de alimentación de la mezcla, las válvulas de salida del flujo de destilado y la válvula de entrada del fluido refrigerante se encuentren abiertas para permitir el paso de las sustancias, evitando así que existan daños por efecto del mal funcionamiento de la torre de destilación.
- Verificar las condiciones finales que debe tener el destilado y las características del mismo, para lograr determinar el tiempo de operación de la torre de destilación el cual permitirá una aproximación de la cantidad de masa refrigerante necesaria para la condensación del vapor de destilado.
- Caracterizar el flujo de alimentación, de destilado y la calidad del agua para evitar daños dentro de la torre de destilación por efecto de fenómenos de corrosión que disminuirá el rendimiento de la torre de destilación.

BIBLIOGRAFÍA

DOMÍNGUEZ, J. G. En: *Dirección de Operaciones: Aspectos Tácticos y Operativos en la producción y los servicios.* España: McGraw-Hill, 1995. pp. 82-83.

GARCÍA, S. Manual práctico para la gestión eficaz del mantenimiento industrial.. En: Madrid: Renovetec, 2013. pp. 30-31.

GIMÉNEZ THOMSEN, C. & G. T. L. *Dirección de la producción: casos y aplicaciones.* España: Universitat Barcelona, 2007. pp. 20-55

KISTER, H. Z. En: *Distillation Operation* . New York [etc.]: McGraw-Hill, 1990. pp. 22-23.

Gas servei. [En línea]. España: Lomas A., 2017 [Consulta: 07 de agosto 2017]. Disponible en : <http://www.gas-servei.com/images/Ficha-tecnica-R404A.pdf>

LUYBEN, W. *Distillation Design and Control Using Aspen Simulation.* Hoboken-New Jersey: Wiley-Interscience, cop., 2006. pp. 12-13.

MCCABE, W. L. En: *Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química.* Madrid: McGraw-Hill, 2000. pp. 69-70.

MEDINA CARRILLO, V. V. & SÁNCHEZ SALINAS, M. A. *Diseño y construcción de un equipo de destilación para la purificación del aceite usado procedente de vehículos.* Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2012. pp. 23-24-25.

Datos Climaticos Mundiales. [En línea]. Muñoz, A. 2017 [Consultado 04 de junio 2017]. Disponible en: <http://es.climate-data.org/location/2973/>

SHINSKEY, F. *Distillation Control.* New Jersey: McGraw-Hill, 1977. pp. 45-46.

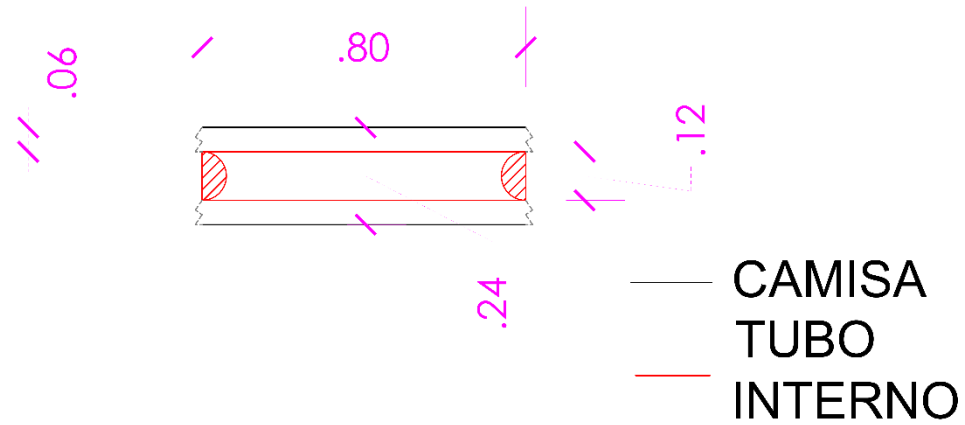
SMITH, J. C. *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química.* Madrid: McGraw-Hill, 1991 pp. 51-52.

ANEXOS

ANEXO A. ALTERNATIVA 1

A)

ANEXO A




NOTAS	CATEGORÍA DEL DIAGRAMA	 <p>Elaborado por: ANDRES MORENO CRISTIAN TOSCANO</p>	ALTERNATIVA 1		
A) ALTERNATIVA 1	a) Por aprobar b) Por calificar c) Por certificar		ESCALA	FECHA	LAMINA
			1:1	09/08/2017	1

ANEXO B. ALTERNATIVA 2

A)

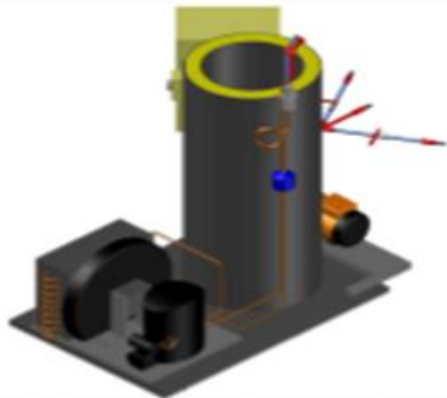
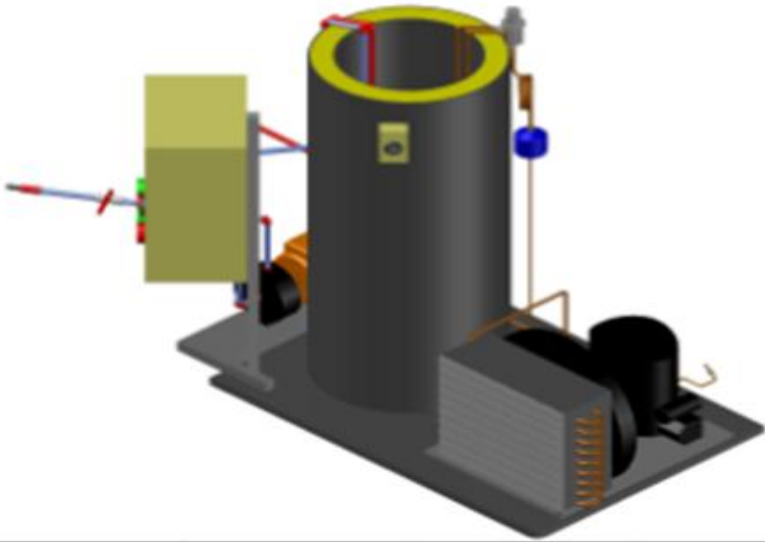
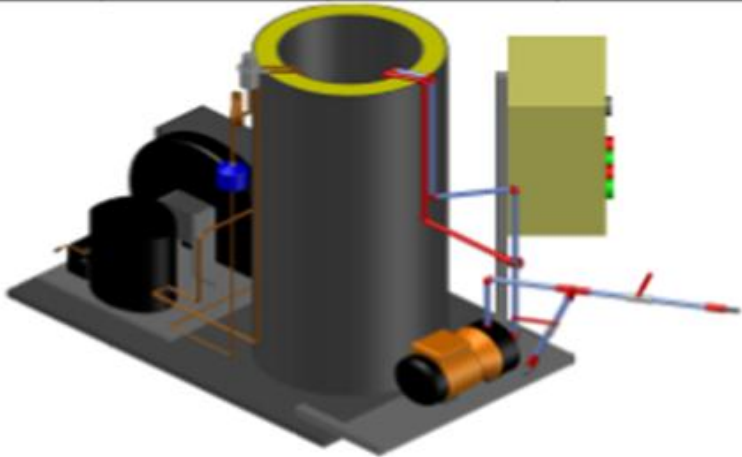
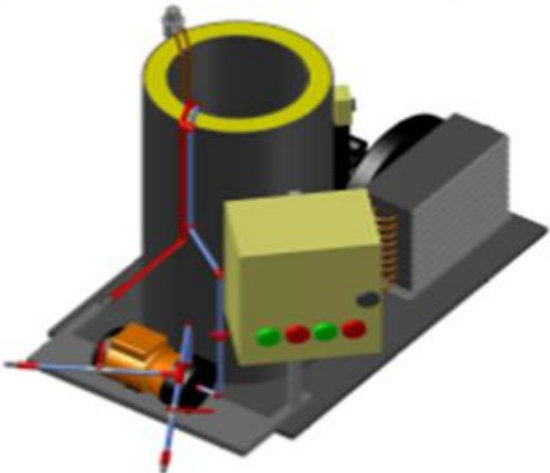
ANEXO B



NOTAS	CATEGORÍA DEL DIAGRAMA		ALTERNATIVA 2		
A) ALTERNATIVA 2	a) Por aprobar b) Por calificar c) Por certificar		ESCALA	FECHA	LAMINA
		ANDRES MORENO CRISTIAN TOSCANO	1:1	09/08/2017	1

ANEXO C. DIAGRAMA DEL EQUIPO EXTERNO

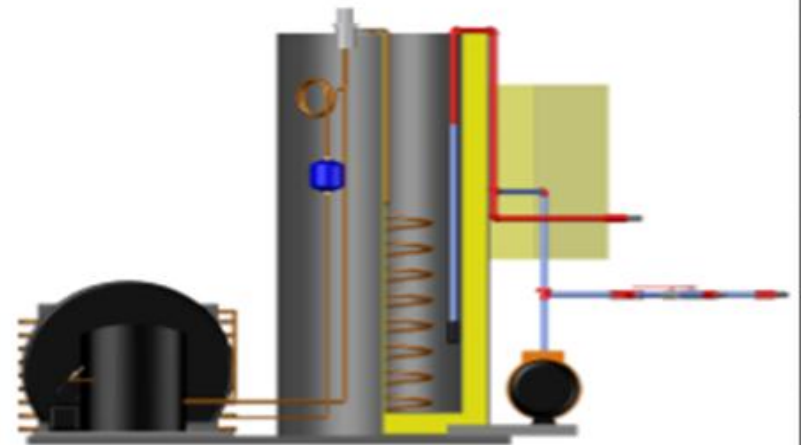
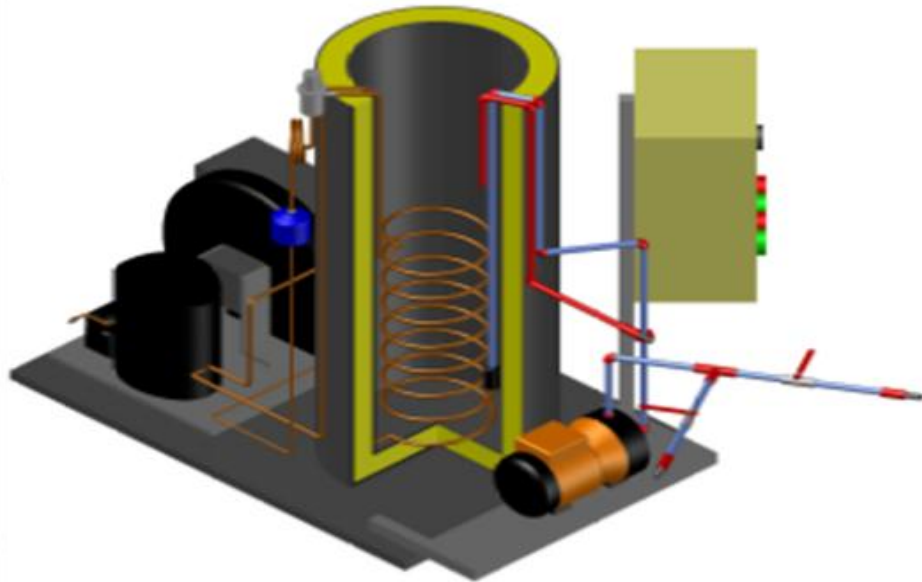
ANEXO C.



Trab. Técnico,		ESPOCH		E.I.Q.	
Proyecto,		Escala		Apl. Torcaso César	
Material:		Tol. Gral		Apl. Moreno Andrés	
		± 0,05		Rev.	
SISTEMA DE ENFRIAMIENTO PARA LA TORRE DE DESTILACIÓN				SOLIDO 3D	
				Nº. 1	

ANEXO D. DIAGRAMA DEL EQUIPO INTERNO

ANEXO D.



Trat. Térmico,		ESPOCH		E.I.Q.	
Receptor					
Material:		Tol. Gral	Escala	A.J.	Torresano C. 17
		± 0,05		A.J.	Morano Andres 06
				Proy.	27
SISTEMA DE ENFRIAMIENTO PARA LA TORRE DE DESTILACIÓN			SOLIDO 3D Y VISTA "DETALLE SERPENTIN"		Nº. 2