

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE EVAPORACIÓN  
MULTIEFECTO (2 ETAPAS) TIPO BANCO DE PRUEBAS USANDO CALOR  
RESIDUAL (O DESECHO) PARA EL LABORATORIO DE SISTEMAS TÉRMICOS

DIANA MARÍA GÓMEZ GONZÁLEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA

2021

DISEÑO Y CONTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE EVAPORACIÓN  
MULTIEFECTO (2 ETAPAS) TIPO BANCO DE PRUEBAS USANDO CALOR  
RESIDUAL (O DESECHO) PARA EL LABORATORIO DE SISTEMAS TÉRMICOS

DIANA MARIA GÓMEZ GONZÁLEZ

Trabajo de grado para optar título de ingeniera mecánica

DIRECTOR:  
DIEGO LUIS FRANCO JÁCOME  
Ingeniero Mecánico PhD

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA  
2021

## DEDICATORIA

*Dedico éste esfuerzo, y todo el trabajo realizado para cumplir con este reto, a todos los que lo intentaron, se lo propusieron y se quedaron por el camino por alguna razón.*

*Siempre tengo presente a mi abuelo Herminio González quien con sus historias y anécdotas me hizo fantasear con el conocimiento para entender lo que decía, para tener ese espíritu curioso, para resolver lo que me proponga, y sortear la vida en medio de las adversidades.*

*A mi Adán Herrera, amigo querido por mantenerme “lejos de la realidad” con sus ocurrencias, por haber hecho tantas cosas por mi sin ser mi familia de sangre.*

*Y a Diego Ramírez porque valoro inmensamente el apoyo moral, emocional, personal y profesional que me brindó.*

*Hoy ninguno de ellos está físicamente acompañando mi logro, pero ellos saben que fueron mi motivación y les mando un beso al cielo.*

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN.....	13
1. OBJETIVO .....	17
1.1 OBJETIVO GENERAL .....	17
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	17
2. MARCO TEORICO .....	18
2.1 EVAPORACIÓN.....	18
2.2 TIPOS DE EVAPORACIÓN AL VACÍO.....	18
2.2.1.Evaporación al vacío mediante bomba de calor.....	18
2.2.2 Evaporación al vacío de múltiple etapa.....	20
2.2.3 Evaporación por compresión mecánica del vapor.....	21
2.2.4 Evaporación por vapor residual.....	22
2.3 CLASIFICACIÓN DE EVAPORADORES .....	23
2.3.1 Evaporadores de tubos horizontales.....	23
2.3.2 Evaporadores de Calandria (Evaporador de tubos verticales cortos) .....	24
2.3.3 Evaporador de tubos verticales con canasta.....	26
2.3.4 Evaporadores de tubos verticales largos. ....	27
3 METODOLOGÍA DEL DISEÑO .....	30
3.1 REQUERIMIENTOS Y CONDICIONES DEL SISTEMA.....	30
3.2 SUBSISTEMAS DEL SISTEMA DE EVAPORACIÓN MULTIEFECTO .....	31
3.2.1 Generador de vapor:.....	31
3.2.2 Sistema de evaporación .....	31
3.2.3 Torre de enfriamiento:.....	32
3.3 MODELAMIENTO TERMODINÁMICO .....	32
3.4 MODELAMIENTO DE TRANSFERENCIA DE CALOR .....	35

3.5 DISEÑO MECÁNICO.....	38
3.6 CÁLCULO DE LAS BRIDAS DE UNIÓN.....	40
4. CONSTRUCCIÓN.....	41
4.1 CONEXIÓN ENTRE EQUIPOS.....	44
4.1.1 Conexión de intercambiadores .....	44
4.1.2 Conexión de intercambiadores a los tanques de condensado .....	46
4.1.3 Conexión de Torre de enfriamiento al sistema de evaporación.....	47
4.2 PRUEBA DE ESTANQUEIDAD .....	48
5 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO.....	50
5.1 SIMPLE EFECTO .....	50
5.2 MULTIEFECTO.....	56
6 COSTOS.....	66
6.1 COSTOS DE ENERGÍA.....	67
6.2 RELACIÓN COSTO-BENEFICIO.....	70
7 CONCLUSIONES .....	71
8 RECOMENDACIONES .....	73
BIBLIOGRAFIA.....	74
ANEXOS .....	75

## LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Ventajas, desventajas y uso en la industria de los evaporadores de tubos horizontales.....	23
Tabla 2. Ventajas, desventajas y uso en la industria de los evaporadores de calandria.....	26
Tabla 3. Ventajas, desventajas y uso en la industria de evaporador de tubos verticales. ....	29
Tabla 4. Datos iniciales. ....	30
Tabla 5. Balance de masa y energía. ....	34
Tabla 6. Resultados de los cálculos termodinámicos para tratar 8 [L/h] en cada evaporador. ....	35
Tabla 7. Resultados de los cálculos termodinámicos para tratar 30 [L/h] en cada evaporador. ....	36
Tabla 8. Cálculos de transferencia de calor para tratar 30 [L/h] en cada evaporador. ....	36
Tabla 9. Resultados obtenidos de la selección de la brida en base a la norma TEMA. ....	40
Tabla 10. Materiales usados en conectar los dos evaporadores y el condensador. ....	45
Tabla 11. Efecto de la presión de vacío en los parámetros de funcionamiento del sistema en simple efecto (a 5 litros volumen constante).....	51
Tabla 12. Experimentos con volumen variable (de 8 litros a 5 litros) y su condensado. ....	53
Tabla 13. Rendimiento de los condensados para diferentes parejas de presiones del sistema de evaporación en la configuración de multiefecto (dos etapas).....	56
Tabla 14. Producción de condensado por hora en las etapas y el generador.....	64

Tabla 15. Consumo de energía por hora. Y para la producción de un litro de condensado. ....65

Tabla 16. Costo de sistema. ....66

Tabla 17. Costos de operación del equipo por periodo de tiempo (1 hora).....69

Tabla 18. Valor de un metro cubico de gas por unidad de tiempo.....70

Tabla 19. Costo de operación de equipo por hora.....70

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Municipios con sistema de tratamiento de aguas residuales (STAR)....	14
Figura 2. Evaporación al vacío mediante bomba de calor.....	19
Figura 3. Evaporación al vacío de simple efecto y múltiple etapa.....	20
Figura 4. Evaporación por compresión mecánica del vapor.....	21
Figura 5. Reutilización del vapor de baja presión (vapor flash).....	22
Figura 6. Evaporador de tubos horizontal.....	24
Figura 7. Evaporador de Calandria (tubos verticales cortos).....	25
Figura 8. Evaporador de tubos verticales de canasta.....	27
Figura 9. Evaporador de tubos verticales largos.....	28
Figura 10. Subsistemas del sistema de evaporación multiefecto.....	31
Figura 11. Diagrama esquemático del sistema de evaporación multiefecto.....	33
Figura 12. Diagrama del sistema de evaporación multiefecto.....	32
Figura 13. Haz de tubos partes del intercambiador, y construcción.....	41
Figura 14. Brida ajustada y disposición del o'ring en las tapas.....	42
Figura 15. Estructura acondicionada para funcionar como bastidor del sistema..	43
Figura 16. Refuerzos para el bastidor del sistema hechos en ángulo.....	44
Figura 17. Inicio de la conexión entre equipos Evaporador- Condensador.....	45
Figura 18. Montaje de conexiones de tubería entre tanques e intercambiadores. .....	46
Figura 19. Imágenes de la conexión entre equipos de servicio y el Sistema de evaporación.....	47
Figura 20. Accesorios del montaje.....	48
Figura 21. Imagen de fugas en el sistema de evaporación.....	48
Figura 22. Aislante térmico y sensores de temperatura.....	49
Figura 23. Desempeño de las temperaturas en un sistema de evaporación en simple efecto a una presión de 22,27 kPa a un volumen constante de 6 litros en el evaporador principal.....	52

Figura 24. Desempeño de las temperaturas en un sistema de evaporación en simple efecto a una presión de 8.70 kPa (P vacío = 24 inHg) a un volumen variable de 8 litros a 5 litros en el evaporador principal.....	53
Figura 25. Evolución de temperatura a 22.27 Kpa (P vacío = 20 inHg).....	54
Figura 26. Comportamiento de la temperatura en el evaporador primario para dos condiciones de volumen.....	55
Figura 27. Desempeño de las temperaturas en un sistema de evaporación en doble efecto a una presión de 45.97 [kPa] primer efecto y 5.341 [kPa] en segundo efecto, a un volumen constante de 6 litros en los evaporadores.....	57
Figura 28. Evolución de temperatura a 45.97 Kpa (P vacío = 13 inHg) Primera etapa y 5.341 Kpa (P vacío = 25 inHg) en segunda etapa con volumen variable de 8 litros a 5.....	59
Figura 29. Comparación de Temperaturas entre experimentos a volumen constante 5 Litros.....	60
Figura 30. Comparación de Temperaturas entre experimentos a volumen constante 5 Litros.....	61
Figura 31. Comparación de Temperaturas entre experimentos a volumen variable 8 Litros.....	62
Figura 32. Comparación de Temperaturas entre experimentos a volumen variable 8 Litros.....	63
Figura 33. Diagrama de porcentaje de gastos fabricación de intercambiadores (73%) gastos de conexión y montaje del sistema (27%).....	67
Figura 34. Parámetros de operación teóricos de: la bomba de vacío (izq.) usada para el funcionamiento y la bomba de circulación de agua de la Torre (der.).....	67
Figura 35. Pinza digital de energía trifásica, ERASMUS en medición de corriente de la torre.....	68
Figura 36. Variación en el registro de gas natural de la Escuela de ingeniería mecánica al iniciar y finalizar la prueba.....	69

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Manual de operación.....	75
Anexo B. Cálculos.....	84
Anexo C. Planos.....	93

## RESUMEN

**TÍTULO:** DISEÑO Y COSTRUCION DE UN SISTEMA DE EVAPORACIÓN MULTIEFECTO (2 ETAPAS) TIPO BANCO DE PRUEBAS USANDO CALOR RESIDUAL (O DESECHO) PARA EL LABORATORIO DE SISTEMAS TERMICOS.\*

**AUTOR:** Diana María Gómez González\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Evaporación por efectos; calor residual o calor de desecho; banco de pruebas; vacío; prototipo.

### **DESCRIPCIÓN:**

En búsqueda de mostrar una solución al problema del vertimiento de aguas residuales industriales y experimentar mediante un prototipo conceptos adquiridos de forma teórica, se diseñó y construyó un prototipo de un sistema de evaporación multiefecto usando calor residual como fuente de energía primaria. El banco de pruebas en el laboratorio de sistemas térmicos, busca de ésta manera traer una parte de la industria a la academia para ver el aprovechamiento de la energía y la reducción de costos. Dicho sistema se ha desarrollado con intercambiadores verticales conectados en doble efecto con alimentación en paralelo, que funcionan con evaporación al vacío ya que permite mantener bajas temperaturas de saturación y aumentar el flujo de agua a tratar gracias al reaprovechamiento de la energía transferida entre efectos, la fuente de energía se simulará con un generador de vapor presente en el laboratorio el cual dará un flujo de calor de desecho, el vapor generado por el sistema se condensará con una torre de enfriamiento. Con el generador y la torre disponibles en el laboratorio se complementa el montaje del prototipo. Este proceso de depuración ayuda a entender de forma tangible conceptos térmicos aplicados. Se dispone del equipo para posibles investigaciones con otros flujos u otras fuentes de energía diferentes al vapor.

---

\*Trabajo de grado

\*\* Facultad de ingenierías físico-mecánicas. Escuela de ingeniería mecánica. Diego Luis Franco Jácome Ingeniero Mecánico PhD

## ABSTRACT

**TITLE:** DESIGN AND CONSTRUCTION OF A MULTI-EFFECT EVAPORATION SYSTEM (2 STAGES) TEST BENCH TYPE USING RESIDUAL HEAT (OR WASTE) FOR THE LABORATORY OF THERMAL SYSTEMS LABORATORIO DE SISTEMAS TERMICOS.\*

**AUTHOR:** Diana María Gómez González\*\*

**KEY WORDS:** Boiling by effects; residual heat or waste heat; testing bench; vacuum; prototype.

### DESCRIPTION:

In search of showing a solution to the problem of industrial wastewater dumping and experimenting with concepts acquired theoretically through a prototype, a prototype of a multi-effect evaporation system was designed and built using waste heat as a primary energy source. The test bench in the thermal systems laboratory, seeks in this way to bring a part of the industry to the academy to see the use of energy and the reduction of costs. This system has been developed with vertical exchangers connected in double effect with parallel feeding, which work with vacuum evaporation since it allows to maintain low saturation temperatures and increase the flow of water to be treated thanks to the reuse of the energy transferred between effects, the Energy source will be simulated with a steam generator present in the laboratory which will give a waste heat flow, the steam generated by the system will be condensed with a cooling tower. The assembly of the prototype is complemented with the generator and tower available in the laboratory. This debugging process helps to tangibly understand applied thermal concepts. The equipment is available for possible investigations with other flows or other sources of energy other than steam.

---

\* Degree work

\*\* Faculty of physical-mechanical engineering. School of Mechanical Engineering. Director: Diego Luis Franco Jácome Ingeniero Mecánico PhD

## INTRODUCCIÓN

El agua hace parte de lo que somos y representa un punto fundamental para la vida. Se usa para el consumo, en las tareas domésticas, en la producción de alimentos o con fines recreativos, por lo que la salubridad del agua y la facilidad a su acceso son importantes. La gestión inadecuada de las aguas residuales urbanas, industriales y agrícolas conlleva a que el agua que beben cientos de millones de personas se vea peligrosamente contaminada o polucionada químicamente.

De aquí a 2025, la mitad de la población mundial vivirá en zonas con escasez de agua,<sup>1</sup> y los desafíos que se presentan con el cambio climático, la contaminación de los recursos hídricos y los suelos, el crecimiento de la población, y la deforestación, implican la reutilización de las aguas residuales como estrategia importante para recuperar agua, nutrientes y energía. Teniendo en cuenta que esta práctica puede tener repercusiones en la salud pública se debe hacer dicha gestión del agua de una manera segura.

En Colombia los tratamientos de aguas residuales municipales se han venido promoviendo de forma gradual, pasando del 27,8 % de las aguas residuales urbanas tratadas en el año 2010 al 42,6 % en el año 2017<sup>2</sup>, en la Figura 1 se presenta un mapa donde se señala los municipios con tratamiento de aguas residuales. Lo anterior ha resultado de los esfuerzos realizados por el estado, las entidades regionales y la empresa privada para avanzar en el saneamiento de vertimientos tomando como bases las directrices del CONPES 3177 que establece acciones prioritarias y lineamientos para la formulación del plan de manejo de aguas residuales, aprobado en el año 2002, y el Programa de Saneamiento de Vertimientos (SAVER) formulado en el año 2006. Estas iniciativas buscan incrementar el volumen de aguas municipales tratadas y de esta manera mejorar la

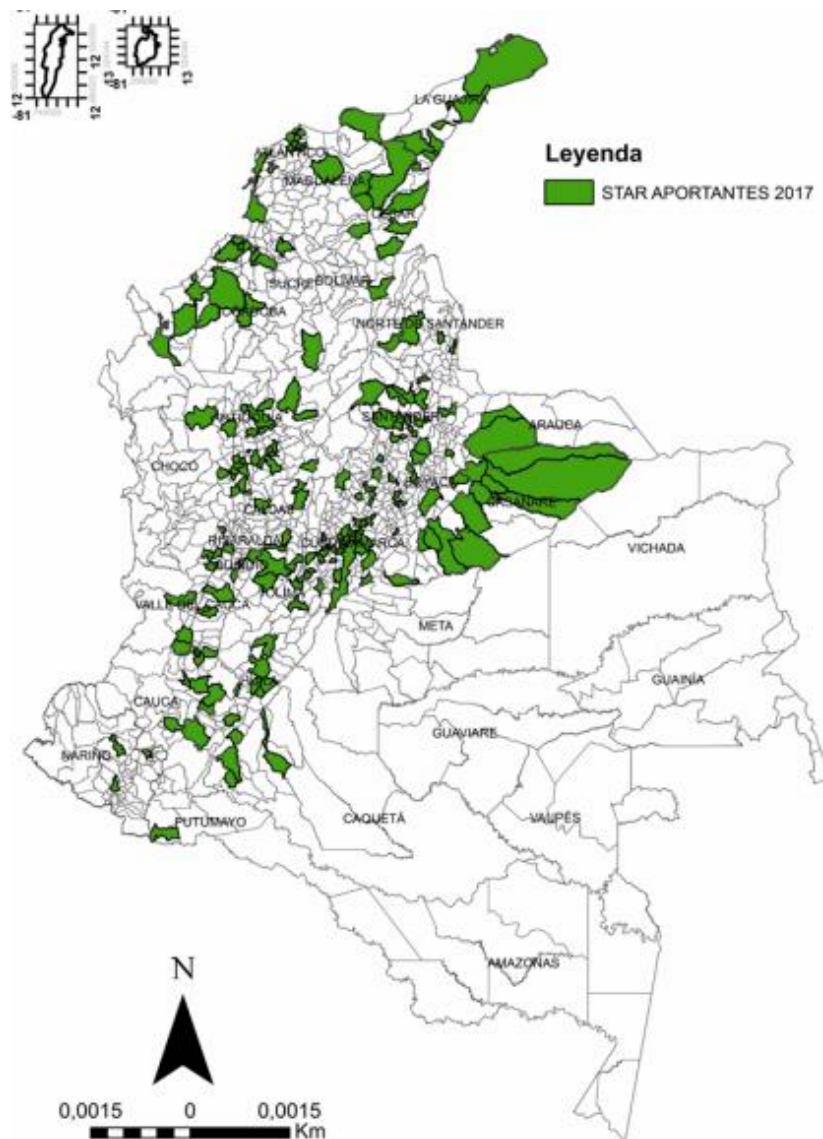
---

<sup>1</sup> OMS, Organización mundial para la salud. Agua. Fecha de aceptación 14 de junio de 2019. [consultado el 8 de julio de 2020].

<sup>2</sup> CONSEJO NACIONAL DE POLÍTICA ECONÓMICA Y SOCIAL CONPES 3948, Bogotá, D.C., 14 de noviembre de 2018. [consultado el 12 de julio de 2020].

calidad del recurso hídrico en el país. Para el vertimiento de residuos líquidos en los sistemas de alcantarillado se establece la Resolución 0631 del 17 de marzo del 2015, que reglamenta el artículo 28 del Decreto 3930 de 2010, donde se especifican los parámetros y valores límites de concentración de contaminantes permitidos para realizar el vertimiento de las aguas residuales de sus respectivas áreas industriales al alcantarillado.

Figura 1. Municipios con sistema de tratamiento de aguas residuales (STAR)



Fuente. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017.

Las industrias son responsables de la mayor parte de dicha contaminación del agua, por lo que están obligadas a cumplir con una serie de requisitos en la calidad final de esta para poder verterla a los cuerpos de agua superficiales o en el alcantarillado público. Por ello, nace la necesidad de buscar sistemas eficientes, no solo desde el punto de vista económico, sino también desde el punto de la calidad final de las aguas tratadas debido a que una alta calidad en estas, permitiría la reutilización de estas en los procesos industriales.

Los tratamientos más comunes para esto son los biológicos, físicos y químicos que son ampliamente utilizados, aunque tienen desventajas, como grandes costos energéticos, producción de lodos y requieren grandes áreas para su instalación. Una alternativa es mediante tratamientos térmicos, como la vaporización aun cuando impliquen un costo energético alto. Este costo se puede disminuir utilizando calor residual que es otro desecho que las industrias suelen ignorar. El calor residual hace referencia a una fracción de energía térmica no aprovechada en procesos industriales un resultado de procesos en equipos térmicos, que producen trabajo. Para aprovechar esta energía, recurrimos a equipos (evaporadores, intercambiadores, economizadores, destiladores) que transmiten el calor que el fluido caliente desprende y lo conduce hacia otro fluido el cual está a una menor temperatura. En estos dispositivos el uso de presiones de vacío ayuda a que el calor latente en los equipos sea mayor y se pueda dar un ahorro energético con ese intercambio. Se pueden presentar en montajes simples o con múltiple efecto. El nivel del efecto será determinado por la cantidad de evaporadores que se dispongan.

El presente proyecto plantea el diseño y construcción de un prototipo que se utilizara como banco de pruebas en el laboratorio de sistemas térmicos. El prototipo utiliza el calor de un generador de vapor que simula el calor residual que se suele desperdiciar en diversos procesos industriales, esta complementa el montaje de evaporadores multiefecto que trabaja en vacío para obtener su saturación en presiones menores a la atmosférica y tiene su proceso de condensado a través de enfriamiento por agua conectado a una torre de enfriamiento disponible en el

laboratorio. Esto permite ampliar la visión de los estudiantes al conocer este tipo de sistemas, que involucra vacío, componentes diferentes a lo ya conocido en el laboratorio (calderas y sistemas de refrigeración), buscando el análisis y comprensión del proceso a utilizar de manera práctica comprobando la teoría y de esta manera afianzando la relación academia-industria.

# 1 OBJETIVO

## 1.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un sistema de evaporación multiefecto (2 etapas) para el laboratorio de sistemas térmicos usando calor residual que permita a los estudiantes de la Universidad Industrial de Santander complementar de manera experimental sus conocimientos.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Diseñar y construir un sistema de evaporación al vacío de múltiple efecto para practicas experimentales en el laboratorio de sistemas térmicos compuesto por los siguientes subsistemas:

Subsistema de evaporación utilizando la energía térmica disponible en un fluido de mayor temperatura.

Subsistemas de alimentación del fluido a tratar y almacenamiento del producto con capacidad de tratamiento de 8 l/h.

Subsistema de monitoreo y control manual de la operación del equipo.

Determinar experimentalmente la productividad del sistema en litros de condensado por kJ de energía utilizada (en forma de calor residual) en cada una de las configuraciones de operación (un efecto y dos efectos)

Determinar el costo especifico de producir un litro de agua con este sistema.

Desarrollar un manual de operación para cada una de las experiencias a realizar.

## 2 MARCO TEORICO

### 2.1 EVAPORACIÓN

La evaporación es un proceso físico por el cual el agua pasa de un estado líquido hacia un estado gaseoso, en donde inicialmente empiezan a formarse pequeñas burbujas de vapor al azar en la superficie donde se encuentre el agua. Cuando dicha burbuja adquiere suficiente energía (aumento de temperatura) vence la tensión superficial haciendo que la burbuja ascienda. Para que este comportamiento se mantenga el agua debe estar más caliente que la temperatura de saturación de la burbuja.

Para facilitar el proceso de evaporación se emplean sistemas generadores de vacío, ya que el vacío ayuda a generar una diferencia de temperatura entre la fuente emisora de calor (vapor) y fuente receptora (agua), debido a que el agua se somete a presiones inferiores a la atmosférica, disminuyendo la temperatura de ebullición del agua y aumentando la eficiencia del fenómeno de transferencia de calor en el sistema. Para dicho proceso se requiere un aporte energético que puede ser generado por gas, electricidad o biomasa, aunque es posible localizar en el proceso productivo excedentes de calor que puedan hacer muy económico el proceso.

### 2.2 TIPOS DE EVAPORACIÓN AL VACÍO.

Los diferentes tipos de evaporación al vacío que podemos encontrar son:

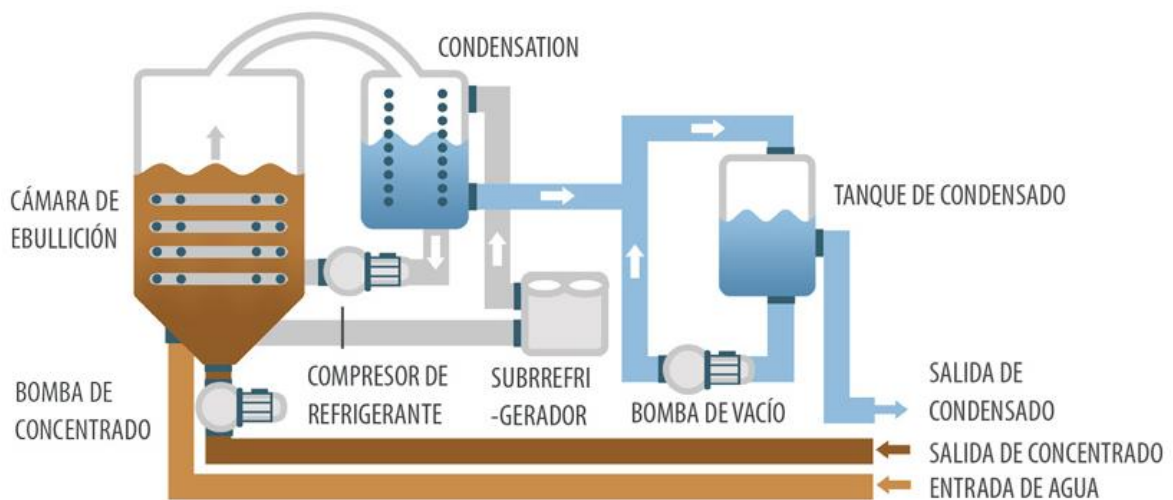
- Evaporación al vacío mediante bomba de calor
- Evaporación al vacío de múltiple etapa
- Evaporación por compresión mecánica del vapor
- Evaporación por vapor residual

**2.2.1. Evaporación al vacío mediante bomba de calor.** El funcionamiento de este sistema se basa en el ciclo frigorífico de un gas refrigerante, el cual se encuentra en un circuito cerrado. el gas refrigerante se comprime mediante la acción de un

compresor aumentando su presión y temperatura. este fluido posteriormente se enfría en un intercambiador de calor donde transfiere energía a el agua residual que se desea tratar. de esta manera se garantiza la condensación del refrigerante y la evaporación del agua residual de manera simultánea. (ver figura 2)

Al trabajar al vacío, la temperatura de ebullición del agua es del orden de 30 a 40°C. Una vez que el líquido refrigerante abandona el intercambiador se expande en una válvula de expansión y se envía a otro intercambiador de calor. En este intercambiador el líquido refrigerante se evapora gracias al intercambio de calor con el vapor proveniente del sistema de evaporación de agua, por consiguiente, se condensa.

Figura 2. Evaporación al vacío mediante bomba de calor.

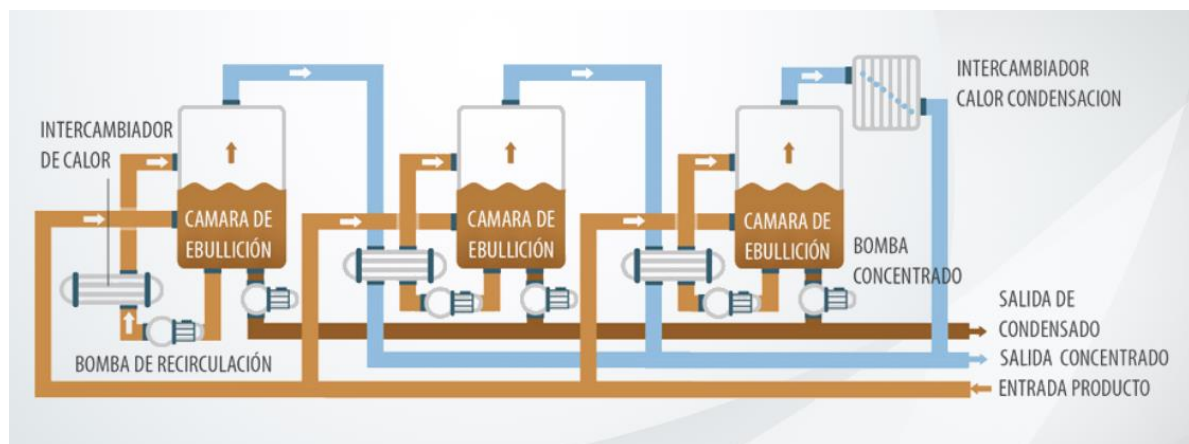
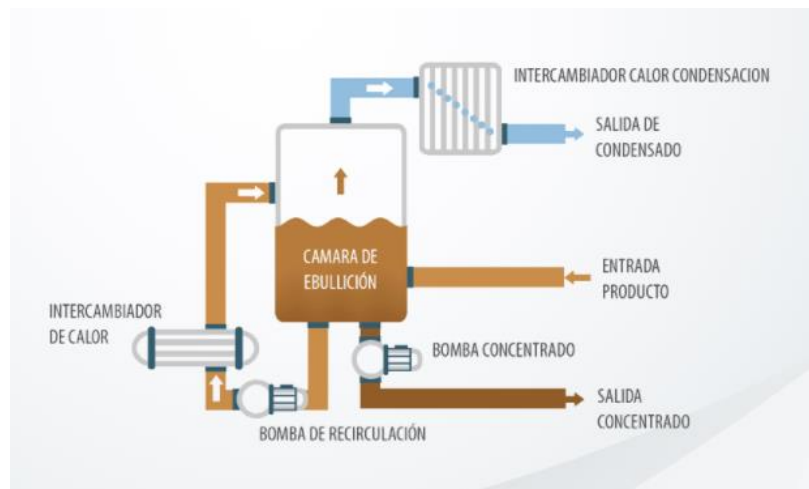


Fuente: CONDORCHEM ENVITECH. Evaporación al vacío mediante bomba de calor. [En línea]. (Recuperado el 25 de septiembre del 2020). Disponible en: <https://condorchem.com/es/evaporadores-al-vacio-por-bomba-de-calor/>

El mismo fluido refrigerante permite evaporar el agua, así como condensar el vapor generado, por lo que el sistema no precisa de otras fuentes ni de calor ni de refrigeración. Este hecho hace que sea un proceso muy ventajoso desde el punto de vista económico y de gestión.

**2.2.2 Evaporación al vacío de múltiple etapa.** los sistemas de evaporación al vacío en múltiple etapa consisten en un conjunto de evaporadores conectados entre sí (en serie ver figura 3), en los que el vacío aumenta progresivamente del primero al último. esto hace que la temperatura de ebullición, en principio, vaya disminuyendo, por lo que es posible utilizar el vapor generado en un evaporador (o etapa) como fluido calefactor de la siguiente etapa, produciéndose un efecto cascada. finalmente, el destilado se condensa mediante una torre de refrigeración, con un consumo de agua poco significativo.

Figura 3. Evaporación al vacío de simple efecto y múltiple etapa.

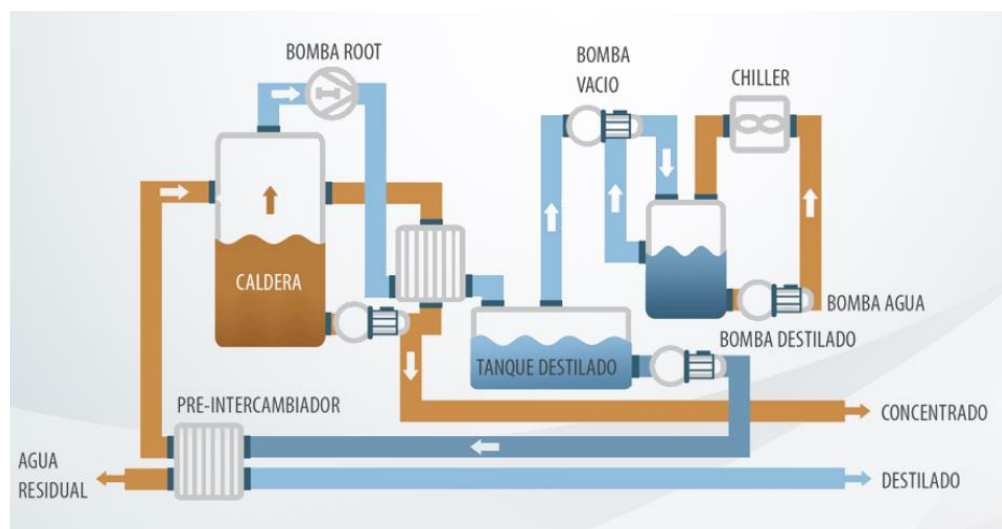


Fuente: CONDORCHEM ENVITECH. Tratamiento de aguas residuales industriales mediante evaporación al vacío. [En línea]. (Recuperado el 25 de septiembre del 2020). Disponible en: <https://bit.ly/2XgQvzc>

Usan como fuente de energía agua caliente o vapor procedente de un circuito externo, lo cual permite aprovechar flujos residuales sobrantes de calor. Casi siempre suelen ser unidades compuestas por 1 (simple), 2 (doble) o 3 (triple) etapas (evaporador). Su principal ventaja respecto a un único evaporador reside en el ahorro tanto de fluido calefactor como de fluido refrigerante. Para tratar caudales elevados, ésta es una de las opciones más competitivas a nivel económico.

**2.2.3 Evaporación por compresión mecánica del vapor.** Los sistemas de evaporación por compresión mecánica se basan en la recuperación del calor de condensación del destilado como fuente de calor para evaporar el agua. Para conseguirlo, la temperatura del vapor generado en la evaporación se incrementa comprimiendo éste mecánicamente. (ver Figura 4) El vapor comprimido, y por tanto sobrecalentado, al pasar por el intercambiador del propio evaporador, consigue un doble objetivo: calentar el líquido a evaporar y condensar, economizando el uso de un fluido refrigerante.

Figura 4. Evaporación por compresión mecánica del vapor.



Fuente: CONDORCHEM ENVITECH. Tratamiento de aguas residuales industriales mediante evaporación al vacío. [En línea]. (Recuperado el 25 de septiembre del 2020). Disponible en: <https://bit.ly/2XgQvzc>

Dicho tipo de evaporador al vacío está diseñado para el tratamiento eficaz de efluentes residuales industriales de los procesos productivos y rechazos de plantas de tratamiento de aguas residuales con un bajo coste energético.

**2.2.4 Evaporación por vapor residual.** Este sistema se caracteriza por ser muy eficiente, debido a que no tiene un costo monetario adicional de consumo energético, ya que se busca la forma de obtener energía de desecho como resultado de los mismos procesos de la planta, los componentes principales de este sistema son el evaporador y el condensador, sin embargo, existen modificaciones con el objetivo de mejorar el rendimiento del sistema. (ver Figura 5)

Figura 5. Reutilización del vapor de baja presión (vapor flash).



Fuente: TLV. COMPAÑÍA ESPECIALISTA EN VAPOR. Compresor de vapor (SC). Recuperación de vapor de baja presión. Aplicaciones. [En línea]. (Recuperado el 25 de septiembre del 2021). Disponible en: <https://cutt.ly/4EnbSGU>

## 2.3 CLASIFICACIÓN DE EVAPORADORES

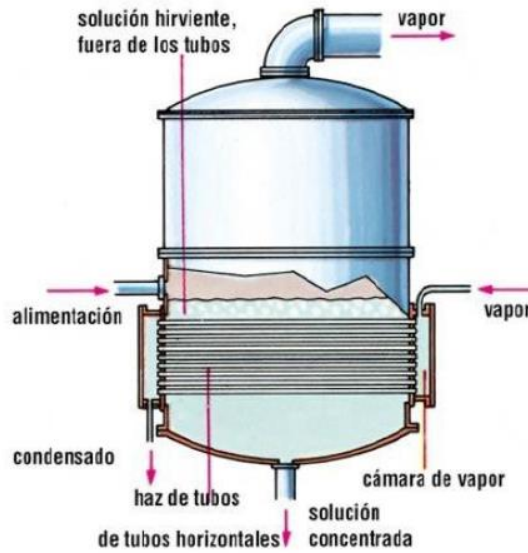
Los evaporadores no poseen fuego directo y convierten el calor latente o sensible de un fluido en calor latente de vaporización de otro. Los evaporadores de circulación natural (que funcionan sin bomba) se clasifican en cuatro clases principales:

**2.3.1 Evaporadores de tubos horizontales.** Los evaporadores de tubos horizontales, como se muestra en la Figura 6, consisten de un cuerpo cilíndrico o rectangular y un haz de tubos que están soportados por dos placas. El vapor entra por los tubos horizontales y se condensa al ceder calor. La solución que sufre el proceso de ebullición circula por fuera de los tubos lo cual elimina las pérdidas de carga hidrostática y mejora la transferencia de calor. Por encima de los tubos existe un espacio que permite la separación por gravedad de las gotas arrastradas por el vapor liberado en la base por lo tubos. Usa diámetros de tubos  $\frac{3}{4}$  a  $1 \frac{1}{4}$  de pulgadas. Esta clase de evaporadores no aprovechan bien las corrientes térmicas inducidas por el calentamiento.

Tabla 1. Ventajas, desventajas y uso en la industria de los evaporadores de tubos horizontales.

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>	<b>Usos en la industria</b>
Necesitan de un espacio reducido para su instalación en la dimensión vertical.	No es satisfactorio para líquidos que formen incrustaciones o que depositen sales.	Se utiliza para procesos donde el producto final es un líquido en lugar de un sólido. Por ejemplo, jarabes de azúcar industrial.
El aire puede purgarse con el vapor no permitiendo que se bloquee la superficie de calentamiento.	Presentan bajo coeficiente de transferencia de calor global.	Para requerimientos simples de evaporación.
Es un equipo de bajo costo		
Los tubos son fáciles de cambiar.		

Figura 6. Evaporador de tubos horizontal



Fuente: Evaporador de tubos horizontales [En línea]. (Recuperado el 7 de julio del 2020). Disponible en: <https://cutt.ly/AEnb9ry>

### 2.3.2 Evaporadores de Calandria (Evaporador de tubos verticales cortos)

Los evaporadores de Calandria, como se muestra en la Figura 7, consisten en un haz de tubos cortos dispuestos verticalmente dentro de la coraza, colocados entre dos espejos que se remachan en las bridas del cuerpo del evaporador.

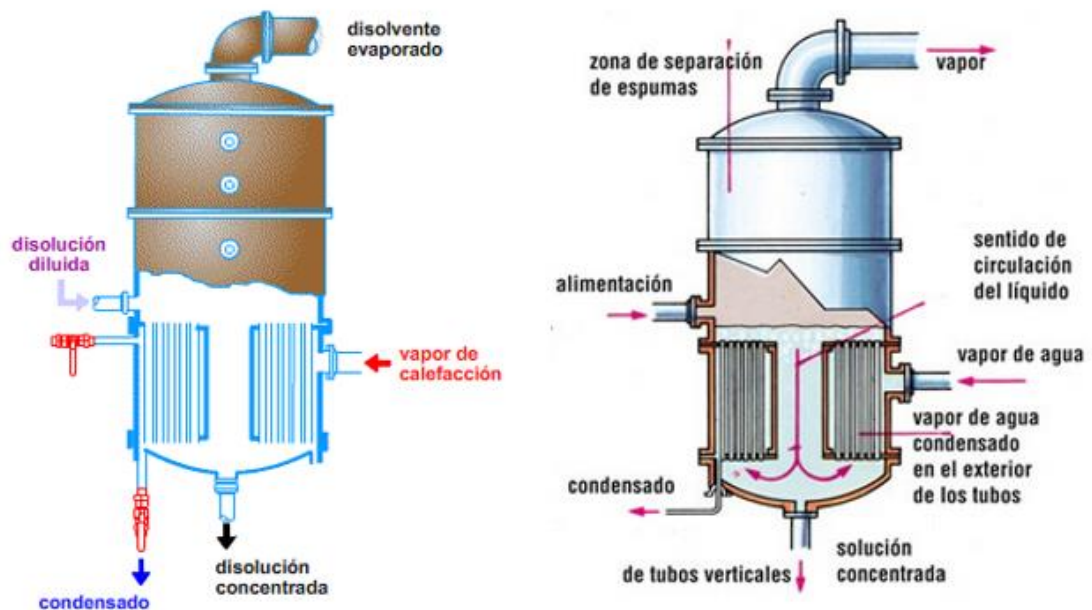
Su operación consiste en que el vapor fluye por fuera de los tubos y el líquido circula por dentro de estos, por lo que el vapor se condensa en el exterior. En el centro del haz de tubos hay un gran paso circular de derrame por donde el líquido concentrado recircula hacia la parte inferior de los tubos, este posee una circulación natural lo cual incrementa el coeficiente de transferencia de calor. El área de este derrame varía desde la mitad del área de los tubos hasta un área igual a ellas. La evaporación tiene lugar dentro de los tubos, saliendo por la parte superior el disolvente evaporado y por la parte inferior la disolución concentrada. El vapor calefactor entra por encima del haz de tubos y sale como agua condensada.

Su principio de operación consiste en la eliminación centrifuga de las gotas de líquido. La incrustación ocurre dentro de los tubos, es posible usar el evaporador estándar para servicios más rigurosos que el evaporador de tubos horizontales,

además, puede instalarse un agitador en el fondo cónico o abombado para aumentar la circulación.

Los tubos son hasta de 3 pulgadas de diámetro exterior, para reducir la caída de presión y permitir la rápida circulación. Unos de los problemas es colocar deflectores en el espacio del vapor, de manera que haya una distribución relativamente completa del vapor en los tubos. Otro problema es el de proveer de punto de purga adecuados para que no se formen bolsas de gases no condensables. El condensado se remueve en cualquier punto conveniente. El espacio sobre el nivel del líquido en la calandria sirve primariamente para liberar el líquido que es arrastrado por el vapor.

Figura 7. Evaporador de Calandria (tubos verticales cortos)



Fuente: Tipos de evaporadores según el método de calentamiento [En línea]. (Recuperado el 8 de julio del 2020). Disponible en: <https://cutt.ly/SEnnzbK>

Un accesorio común a todos los evaporadores es una trampa que está instalada en la línea de vapor con el propósito de remover el líquido arrastrado y de devolverlo

al cuerpo del líquido. En la Tabla 2 se muestran las ventajas, desventajas y usos industriales de este tipo de evaporadores.

Tabla 2. Ventajas, desventajas y uso en la industria de los evaporadores de calandria.

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>	<b>Usos en la industria</b>
Estos evaporadores poseen una velocidad de evaporación adecuada para los líquidos no corrosivos con viscosidad moderada	Pobre transferencia de calor a bajas de diferencias de temperaturas y bajas temperaturas	Se usa en sistemas donde se trabaje con líquidos claros y líquidos relativamente no corrosivos.
Altos coeficientes de transferencia de calor a altas diferencias de temperatura	Alto peso y espacio de suelo	
Baja altura	Alta retención	
Desincrustación mecánica fácil	Pobre transferencia de calor con líquidos viscosos.	
Bajo costo		

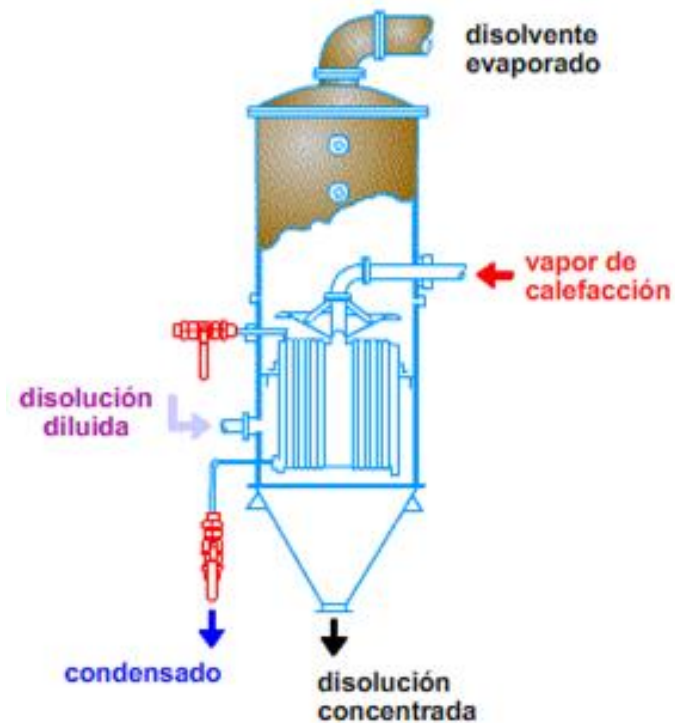
**2.3.3 Evaporador de tubos verticales con canasta.** Los evaporadores de tubos verticales con canasta son similares a los de calandria, excepto en que tiene el haz de tubos verticales desmontables, lo que permite una limpieza rápida. El haz de tubos se soporta sobre ménsulas interiores y el derramadero está situado entre el haz de tubos y el cuerpo del evaporador, en lugar de en la pared central. Debido a que los espejos están soportados libremente, el problema de la expansión diferencial entre los tubos y el cuerpo vapor no es importante. (ver Figura 8)

Se diseña con un fondo cónico y se le puede instalar un agitador para aumentar la circulación. Este tipo de evaporador se utiliza cuando lo que se pretende es llevar la evaporación al extremo, es decir, evaporar todo el disolvente de la solución diluida para obtener cristales. Los cristales formados se recogen por la parte inferior. El

elemento calefactor se trata de un cuerpo compacto que se puede extraer para su limpieza.

Como resultado de estas ventajas mecánicas, el evaporador de canasta puede usarse para licores con tendencia a incrustar, aun cuando se recomienda para líquidos con altas viscosidades o muy incrustantes. El elemento de calefacción forma una unidad independiente y la bajada del líquido es un anillo entre la envoltura y el elemento de calefacción.

Figura 8. Evaporador de tubos verticales de canasta



Fuente: Tipos de intercambiadores de calor. [En línea]. (Recuperado el 8 de julio del 2020). Disponible en: <https://acortar.link/4zY3CJ>

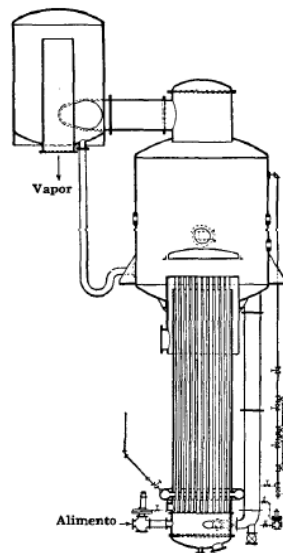
**2.3.4 Evaporadores de tubos verticales largos.** En los evaporadores de tubos verticales largos el vapor entra a través del cinturón y el haz de tubos tiene deflectores de manera de lograr un movimiento libre del vapor, condensados y no condensados hacia abajo. El espejo superior de los tubos está libre, y justamente

sobre él hay un deflector de vapor para reducir el arrastre. Estos intercambiadores consisten en una cámara vertical hecha de un intercambiador tubular y una cámara de separación. El líquido diluido que circula por dentro de los tubos se debe precalentar antes de entrar a los tubos, hasta casi la temperatura de ebullición.

Una vez dentro de los tubos, el líquido comienza a hervir y la expansión debido a la vaporización produce la formación de burbujas de vapor que circulan a alta velocidad y arrastran el líquido, que continúa concentrándose mientras se mueve hacia delante.

No es especialmente adaptable a los licores incrustantes o que depositan sales, pero es excelente para el manejo de líquidos espumosos o que forman natas. (ver Tabla 3) La velocidad del vapor que sale de los tubos es mayor que en los tipos de tubos verticales cortos. Cuando recirculación, como se muestra en la Figura 9, la liberación de los vapores ocurre fuera del cuerpo del evaporador; se usan tubos usualmente de 1 ¼ a 2 pulgadas (31.75 a 50.8 mm) de diámetro y de 12 a 14 pies (3.66 a 6.10 m) de longitud.

Figura 9. Evaporador de tubos verticales largos



Fuente: KERN. Donald Q. Procesos de transferencia de calor. México: Mcgraw Hill, 1999. p. 437-449)

Tabla 3. Ventajas, desventajas y uso en la industria de evaporador de tubos verticales.

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>	<b>Usos en la industria</b>
Bajo costo.	Mucha altura	Se aplican a:
Grandes superficies de calentamiento en un solo cuerpo	Inadecuados para líquidos que ensucian	líquidos claros, líquidos espumantes, soluciones corrosivas
Bajo tiempo de retención	Pobres coeficientes de transferencia de calor para los de película ascendente a bajas diferencias de temperatura	altas diferencias de temperatura (película ascendente)
Buenos coeficientes de transferencia de calor a diferencias de temperaturas razonables (película ascendente)	Los de película descendente usualmente requieren de recirculación	bajas diferencias de temperaturas (película descendente) operaciones a baja temperatura (película descendente).
Buenos coeficientes de transferencia de calor para todas las diferencias de temperatura (película descendente)		

### 3 METODOLOGÍA DEL DISEÑO

#### 3.1 REQUERIMIENTOS Y CONDICIONES DEL SISTEMA

Para el cálculo termodinámico y de transferencia de calor se hacen las siguientes suposiciones:

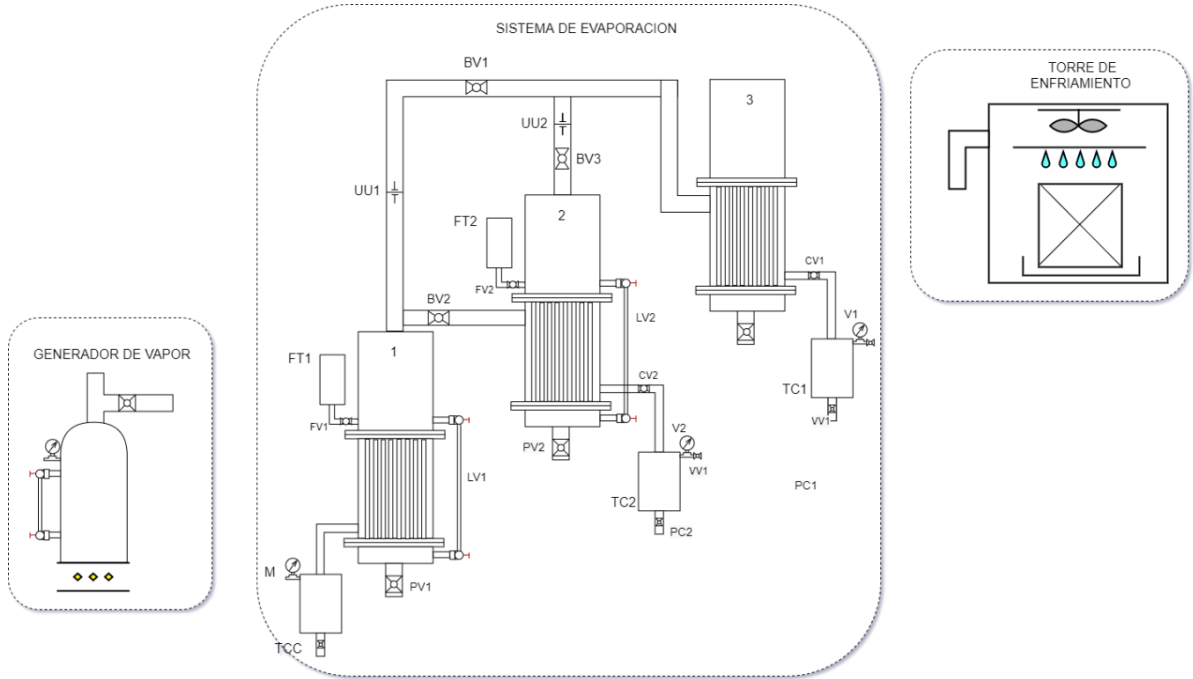
- Cálculos del sistema en estado estable.
- Análisis cero dimensional.
- Se toman las propiedades del agua pura (se desprecia el efecto de ascenso ebulloscópico).
- Se desprecian las pérdidas por transferencia de calor con el ambiente (se asume aislamiento), la caída de presión por tubería y el efecto de los gases no condensables que están almacenados en el agua contaminada.
- El vacío se debe realizar mediante una bomba de vacío la cual se debe conectar a cada uno de los evaporadores por separado mediante las válvulas de acceso disponibles en los tanques de condensado.
- Funcionamiento del sistema por lotes por lo que se hacen necesarias las reposiciones de nivel (líquido) y vacío.

Tabla 4. Datos iniciales.

Parámetros iniciales	
Caudal de agua a tratar, 8 l/h para cada evaporador	$\dot{V}_{agua} = 16 [L/h]$
Temperatura de ingreso del agua	$T_{amb} = 23 [^{\circ}C]$
Temperatura del generador de vapor	$T_{Genvapor} = 97 [^{\circ}C]$
Presión atmosférica	$P_{atm} = 90,659 [KPa]$
Espesor de los tubos	<i>Para un SCH 10, espesor = 3,42 [mm]</i>
Presión absoluta del evaporador 2, para una presión de vacío correspondiente a 25 [inHg]	$P_{abs,EV2} = 5,341 [KPa]$
Temperatura de ingreso del agua de la torre	$T_9 = 23 [^{\circ}C]$
Temperatura de salida del agua de la torre	$T_{10} = 25 [^{\circ}C]$

### 3.2 SUBSISTEMAS DEL SISTEMA DE EVAPORACIÓN MULTIEFECTO

Figura 10. Subsistemas del sistema de evaporación multiefecto



**3.2.1 Generador de vapor:** Dispositivo que permite transformar la energía química contenida en un combustible (en este caso gas natural) en energía térmica. Debido a que se transfiere al agua la energía en forma de calor obtenida del gas natural para que esta se convierta en vapor. Dicho vapor se utiliza como fuente de energía (simulando el vapor residual de una planta) en el sistema de evaporación.

**3.2.2 Sistema de evaporación:** conformado por dos evaporadores, un condensador, dos tanques de alimentación, tres tanques de condensado y una tubería de acero inoxidable que une a los intercambiadores. Los evaporadores de agua son intercambiadores de calor de casco y tubos tipo calandria (tubos verticales cortos), por el casco se realiza la ebullición del agua mediante el calor obtenido del generador de vapor que pasa por el interior de los tubos. El condensador de agua es un intercambiador de calor de casco y tubos tipo calandria (tubos verticales

cortos), por el casco se realiza la condensación del vapor de agua debido a que el calor es extraído por la torre de enfriamiento.

**3.2.3 Torre de enfriamiento:** dispositivo térmico utilizado para enfriar agua mediante la evaporación de un pequeño porcentaje de la misma agua que se enfría. El aire atmosférico se pasa a través de un relleno por donde circula el agua en un circuito cerrado.

El diagrama de tubería e instrumentación del sistema se puede observar en la Figura 12.

### 3.3 MODELAMIENTO TERMODINÁMICO

Se hace un diagrama cero dimensional del sistema de evaporación multiefecto en donde se muestran un volumen de control en cada evaporador, esto se hace para aplicar la primera ley de la termodinámica y realizar un balance de masa en cada evaporador con el propósito de obtener los parámetros de operación de este. En la tabla 5 se listan las ecuaciones para determinar los valores.

Figura 11. Diagrama esquemático del sistema de evaporación multiefecto.

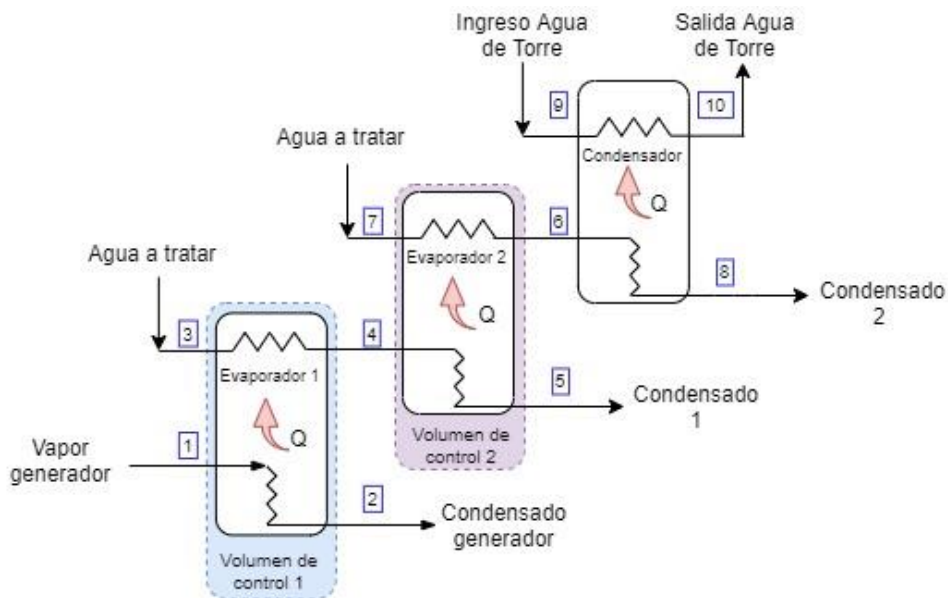


Figura 12. Diagrama del sistema de evaporación multiefecto

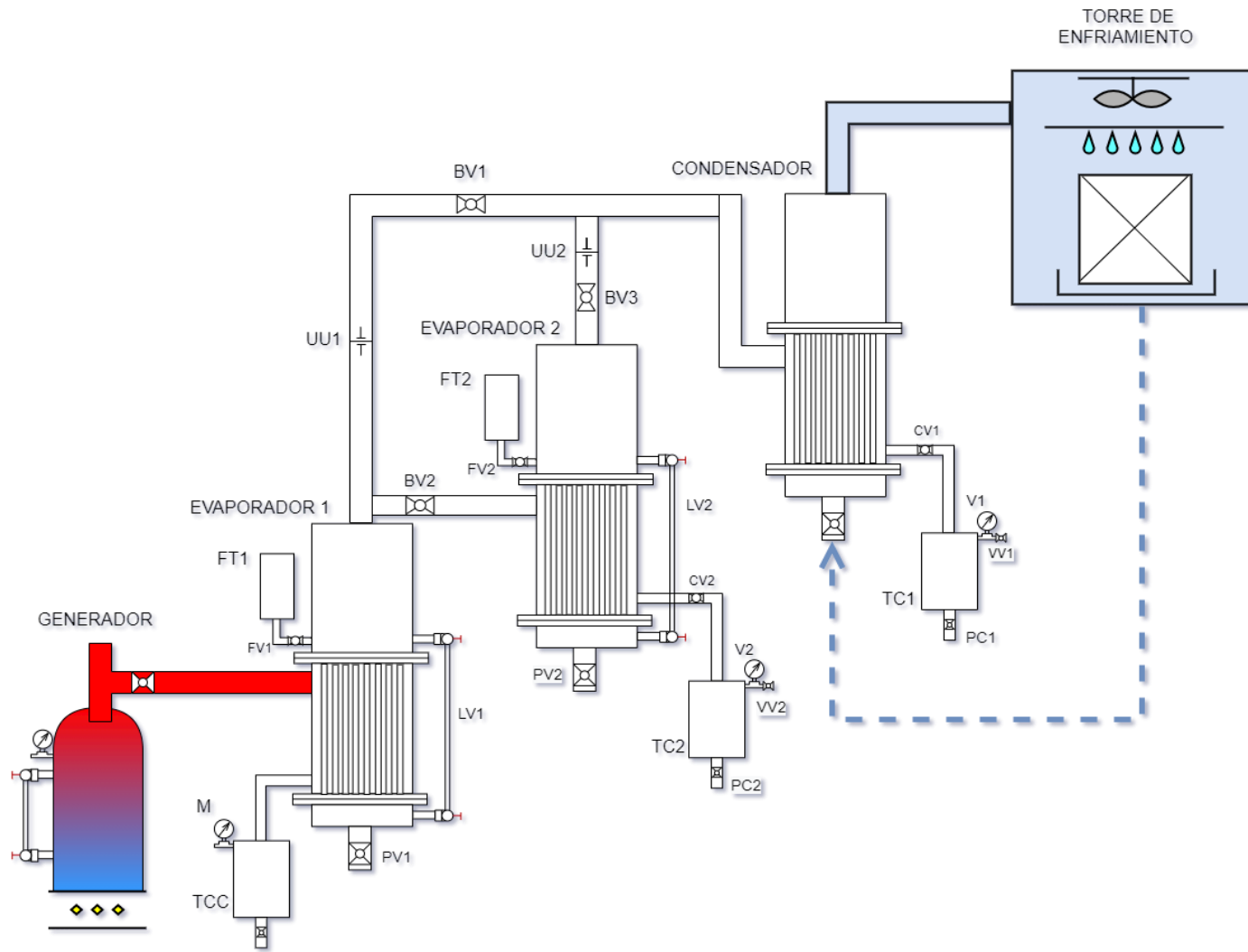


Tabla 5. Balance de masa y energía.

Descripción	Ecuaciones	Valores conocidos
Balance de masa en los evaporadores	$\dot{m}_T = \dot{m}_{w1} + \dot{m}_{w2}$	$\rho_{agua} = 997,4 \left[ \frac{Kg}{m^3} \right]$
	$\dot{m}_T = \rho_{agua} * \dot{V}_{Agua}$	$\dot{m}_T = 0,004444 \left[ \frac{Kg}{s} \right]$
Balance de energía en el primer efecto	$Q_1 = \dot{m}_c * (h_1 - h_2)$	$T_1 = T_2 = 97 [^{\circ}C]$
	$Q_1 = \dot{m}_{w1} * (h_4 - h_3)$	$h_1 = 2671 \left[ \frac{KJ}{Kg} \right]$
	$h_1 = f(Water; T_1; x = 1)$	$h_2 = 406,5 \left[ \frac{KJ}{Kg} \right]$
	$h_2 = f(Water; T_2; x = 0)$	$T_3 = 23 [^{\circ}C]$
	$h_3 = f(Water; T_3; P_{absev1})$	$T_4 = T_5 = 74,81 [^{\circ}C]$
	$h_4 = f(Water; T_4; x = 1)$	$h_3 = 96,42 \left[ \frac{KJ}{Kg} \right]$
Balance de energía en el segundo efecto	$Q_2 = \dot{m}_{vap1} * (h_4 - h_5)$	$T_7 = 23 [^{\circ}C]$
	$Q_2 = \dot{m}_{vap2} * (h_6 - h_7)$	$T_6 = T_8 = 47,69 [^{\circ}C]$
	$h_5 = f(Water; T_5; x = 0)$	$h_5 = 313,2 \left[ \frac{KJ}{Kg} \right]$
	$h_6 = f(Water; T_6; x = 1)$	$h_6 = 2587 \left[ \frac{KJ}{Kg} \right]$
	$h_7 = f(Water; T_7; P_{absev2})$	$h_7 = 96,39 \left[ \frac{KJ}{Kg} \right]$
	$h_8 = f(Water; T_8; x = 0)$	$h_8 = 199,7 \left[ \frac{KJ}{Kg} \right]$

De lo anterior, se obtiene:

Tabla 6. Resultados de los cálculos termodinámicos para tratar 8 [L/h] en cada evaporador.

Variable	Resultado
$\dot{m}_{w1}$	0,002301 $\left[\frac{Kg}{s}\right]$
$\dot{m}_{w2}$	0,002144 $\left[\frac{Kg}{s}\right]$
$Q_1$	5,838 [KW]
$Q_2$	5,34 [KW]

### 3.4 MODELAMIENTO DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Conociendo los valores de operación hallados con los cálculos termodinámicos anteriores se procede a determinar las áreas y el número de tubos que requiere cada intercambiador para cumplir con los requerimientos (ver la Tabla 4), con lo cual se usa el método de la LMTD. Se requiere calcular la LMTD y el coeficiente global de transferencia de calor en cada intercambiador, el cual incluye los coeficientes de convección por condensación, por vaporización, por convección forzada y por incrustación que varían según el intercambiador, ya que el calor transferido se conoce del balance de masa y energía.

Después de conocer el número de tubos totales se escogerá el mayor con la finalidad de calcular el diámetro interior de la coraza, facilitando los requerimientos del tubo tales como:

Diámetro de tubería los evaporadores: Tubería sanitaria de 3/4" SCH 40 (Dext=19,02 [mm], Dint=15,6[mm], Espe=3,42 [mm]), se asume este tipo de tubería debido a que es la que se encuentra comercialmente.

Longitud de tubos de los evaporadores: Se toma como dato la longitud de los tubos con base en el tubo comercial de 5,8 [m], por lo tanto, se va a dividir en partes iguales con la finalidad de evitar el desperdicio de tubería, se decide en 18 partes

cada tubo ya que se toma que la longitud de los tubos para cada intercambiador será:  $L=30$  [cm].

Se realizaron los cálculos con los valores anteriores (tratar 8 [L/h] en cada evaporador), los resultados obtenidos de la transferencia de calor arrojan datos sumamente pequeños, dando un número de tubos de 8 y áreas de  $0,139$   $m^2$ , lo cual no es apto para la construcción y no justifica la inversión. Por lo que se planteó aumentar el flujo másico total de 60 [L/h] (cada evaporador trataría 30 [L/h]) un criterio recomendado por el ex-director del proyecto, pues esto simplifica la construcción del sistema y permite utilizar el sistema para prácticas en el laboratorio o utilizarse en dicho caso para pruebas de la industria.

Se repitieron los cálculos termodinámicos para un flujo másico total de 60 [L/h], obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Resultados de los cálculos termodinámicos para tratar 30 [L/h] en cada evaporador.

Variable	Resultado
$\dot{m}_T$	$0,01667 \left[ \frac{Kg}{s} \right]$
$\dot{m}_{w1}$	$0,008627 \left[ \frac{Kg}{s} \right]$
$\dot{m}_{w2}$	$0,00804 \left[ \frac{Kg}{s} \right]$
$Q_1$	$21,89$ [KW]
$Q_2$	$20,02$ [KW]

Tabla 8. Cálculos de transferencia de calor para tratar 30 [L/h] en cada evaporador.

Parámetros	Descripción	Ecuaciones
$LMTD$	Se calcula la LMTD (diferencia logarítmica de temperatura).	$LMTD_{ev1} = \frac{(T_1 - T_3) - (T_2 - T_4)}{\ln \left[ \frac{(T_1 - T_3)}{(T_2 - T_4)} \right]}$ $LMTD_{ev1} = 43,04$ [°C]

		$LMTD_{ev2} = \frac{(T_4 - T_7) - (T_5 - T_6)}{\ln \left[ \frac{(T_4 - T_7)}{(T_5 - T_6)} \right]}$ $LMTD_{ev2} = 38,14 \text{ [}^\circ\text{C]}$ $LMTD_{cond} = \frac{(T_6 - T_9) - (T_8 - T_{10})}{\ln \left[ \frac{(T_6 - T_9)}{(T_8 - T_{10})} \right]}$ $LMTD_{cond} = 23,68 \text{ [}^\circ\text{C]}$
$h_{ext}$	Se calcula el coeficiente promedio de condensación en toda la superficie externa con la correlación de Kern (Kern, 1999 p.316).	$h_{ext} = 0,943 \left( \frac{K_{ic}^3 * \rho_{ic}^2 * \lambda_{ic} * g}{\mu_{ic} * L_{ic} * \Delta T_{ic}} \right)^{\frac{1}{4}}$ $h_{ext1} = 13,73 \left[ \frac{KW}{m^2 * K} \right]$ $h_{ext2} = 12,96 \left[ \frac{KW}{m^2 * K} \right]$ $h_{ext3} = 11,22 \left[ \frac{KW}{m^2 * K} \right]$
$h_{int}$	Se usa la correlación de Gungor (Gungor & Winterton, 1986)	$h_{int} = E * h_l + S * h_{pool}$ $h_{int1} = 2,5 \left[ \frac{KW}{m^2 * K} \right]$ $h_{int2} = 2,7 \left[ \frac{KW}{m^2 * K} \right]$
$h_{convintIC3}$	El coeficiente de transferencia de calor por convección forzada de un flujo laminar completamente desarrollado en sección circular con temperatura constante. (Cengel; Transferencia de calor y masa)	$h_{convintIC3} = \frac{Nu_{ic3} * K_{fic3}}{d_{intic3}}$ $Nu_{ic3} = 0,023 * Re_{w;ic3}^{0,8} * Pr_{w;ic3}^{0,4}$ $h_{convintIC3} = 13,54 \left[ \frac{KW}{m^2 * K} \right]$

$R_{total}$	La resistencia térmica total es igual a la sumatoria de las resistencias térmicas parciales: por condensación promedio en tubo vertical, por conducción en tubería, por vaporización y por incrustaciones.	$R_{TotalIC} = \frac{1}{h_{int} * A_{intIC}} + \frac{\ln \left[ \frac{d_{extIC}}{d_{intIC}} \right]}{K_{matIC} * 2 * \pi * L_{IC} * n_{tubosIC}} + \frac{1}{h_{ext} * A_{extIC}} + \frac{f_{incrustext}}{A_{extIC}} + \frac{f_{incrustint}}{A_{intIC}}$ $R_{TotalIC1} = 1,966 \left[ \frac{K}{KW} \right]$ $R_{TotalIC2} = 1,905 \left[ \frac{K}{KW} \right]$ $R_{TotalIC3} = 1,234 \left[ \frac{K}{KW} \right]$
$U$	Cálculo del coeficiente global de transferencia.	$U_{IC} = \frac{1}{R_{TotalIC} * A_{extIC}}$ $U_{IC1} = 0,9763 \left[ \frac{m^2 * K}{KW} \right]$ $U_{IC2} = 1,008 \left[ \frac{m^2 * K}{KW} \right]$ $U_{IC3} = 1,555 \left[ \frac{m^2 * K}{KW} \right]$
$\dot{A}_{total ext}$	Área requerida para garantizar la transferencia de calor solicitada.	$Q = U_{IC} * A_{extIC} * LMTD$ $A_{extIC1} = A_{extIC2} = A_{extIC3}$ $A_{extIC1} = 0,5211 [m^2]$

### 3.5 DISEÑO MECÁNICO

Anteriormente en el diseño térmico de cada uno de los componentes del sistema se determinaron las dimensiones globales que garantizaban el proceso de

transferencia de calor, tales como: la longitud de los tubos, el área de transferencia y el número de tubos totales de cada intercambiador.

A continuación, se presentan las ecuaciones y los estándares TEMA para el diseño de intercambiadores de carcasa y tubos.

Evaporador: el evaporador de agua es un intercambiador de calor de carcasa y tubos vertical con 30 tubos de acero inoxidable, los cuales tienen un diámetro de  $\frac{3}{4}$  y una longitud de transferencia de calor de 30 cm.

En el anexo B, se muestran las ecuaciones y relaciones empleadas en los cálculos para el diseño del diámetro de la carcasa del evaporador, las cuales se obtuvieron de la sección 3.3.5. llamada datos de entrada y practicas recomendadas del Heat Exchanger Design Handbook (HEDH) de E.U. Schlunder. Dichos cálculos se hicieron utilizando software EES.

Los resultados de los cálculos son:

$$\text{Longitud nominal de los tubos: } L_{Toe1} = 0,30003042 [m] \approx 30 [cm]$$

$$\text{Diámetro interno de la carcasa: } D_{Se1} = 0,2092 [m] \approx 21 [cm]$$

Condensador: el condensador de agua es un intercambiador de calor de carcasa y tubos vertical con 30 tubos de acero, los cuales tienen un diámetro de  $\frac{3}{4}$  y una longitud de transferencia de calor de 30 cm.

En el anexo B, se muestran las ecuaciones y relaciones empleadas en los cálculos para el diseño del diámetro de la carcasa del condensador, las cuales se obtuvieron de la sección 3.3.5. llamada datos de entrada y practicas recomendadas del Heat Exchanger Design Handbook (HEDH) de E.U. Schlunder. Dichos cálculos se hicieron utilizando la ayuda del software EES.

Los resultados de los cálculos son:

$$\text{Longitud nominal de los tubos: } L_{Toe2} = 0,30003042 [m] \approx 30 [cm]$$

$$\text{Diámetro interno de la carcasa: } D_{Se2} = 0,2092 [m] \approx 21 [cm]$$

### 3.6 CÁLCULO DE LAS BRIDAS DE UNIÓN

El material usado en la brida fue acero inoxidable 304, son bridas de cara plana. Para la selección de la brida, se siguió la norma TEMA (Standards of the tubular exchanger manufactures association), octava edición. En la norma esta la tabla 1A que lista las especificaciones de los materiales para bridas que nos indica la tabla de rating de presión y temperatura según el material escogido, se utilizó ASTM A182 Gr F1 que indica ir a la tabla 2-1.5 rating para materiales del grupo 1.5. entramos en la tabla con la temperatura de 167°F y la presión de operación de 15 psi, seleccionamos el rating de la brida que en este caso es una brida de 150 Lb. En la tabla D-3 dimensiones de bridas norma ASME, se buscó la tabla de bridas de 150 Lb con el valor del diámetro nominal del casco que es 8 pulgadas y se obtuvo el valor del espesor de la brida (T), diámetro de la brida (A), diámetro nominal del centro de pernos (C), numero de tornillos y el diámetro nominal de los tornillos.

Tabla 9. Resultados obtenidos de la selección de la brida en base a la norma TEMA.

Parámetro	Valor [pulgadas]
Espesor de la brida (T)	$1\frac{1}{4}$
Diámetro de la brida (A)	16
Diámetro nominal del centro de pernos (C)	$14\frac{1}{4}$
Numero de tornillos	12
Diámetro nominal de los tornillos	$\frac{5}{16}$

#### 4. CONSTRUCCIÓN

Con base en el diseño térmico, mecánico y el modelo CAD (Anexos B y C) se construyeron los evaporadores-condensadores con cuerpo en tubería de acero inoxidable 304 de 8" Schedule 10s al igual que los cuerpos de las tapas.

La longitud de los intercambiadores está definida desde el diseño térmico, la calandria tiene igual longitud que los tubos, puesto que se debe tener presente la longitud efectiva de transferencia de calor como base para determinar el número de tubos necesarios que fueron 30. La dimensión del tubo se sabía de los parámetros iniciales  $\frac{3}{4}$  de diámetro. Al comprar el material se hizo bajo el criterio de escoger un tubo que se aproximara en dimensiones a lo calculado, es por eso que se compró tubo sanitario, que tiene un espesor menor, y permitió mayor transferencia de calor y dar más espacio entre ellos para poder soldar.

Figura 13. Haz de tubos partes del intercambiador, y construcción.



Los intercambiadores constan de tres partes principalmente (ver Figura 13), la calandria y dos tapas, una superior y una inferior más pequeña, que se unen entre sí por dos bridas.

Las bridas se seleccionaron en el diseño mecánico, fueron ajustadas con 12 pernos de 5/16 cada una (ver Figura 14), se compró lámina de 3/8" de espesor, de donde se sacaron haciendo corte con plasma. La parte interna del corte se usó para las tapas, que complementaron el cilindro usado como cuerpo del intercambiador.

Figura 14. Brida ajustada y disposición del o'ring en las tapas.



La selección del sello y no empaque, se hizo por practicidad, ya que al estar confinado el o'ring tiene un mayor efecto de hermeticidad, sellan en diversos rangos de presiones y temperaturas, no necesitan ajustes, requieren espacios reducidos y son económicos. Se mecanizó la ranura en la parte de la brida que se une a las tapas y se compró un o'ring a medida.

La soldadura de tapas, calandria y orificios de entrada y salida de fluidos con sus niples, fueron realizadas con soldadura MIG (*Metal Inert Gas*).

Una vez contruidos y montados los intercambiadores de calor (evaporador/condensador), se les realizaron pruebas de hermeticidad con sus respectivos tapones y se rectificó la soldadura donde se presentaron fugas.

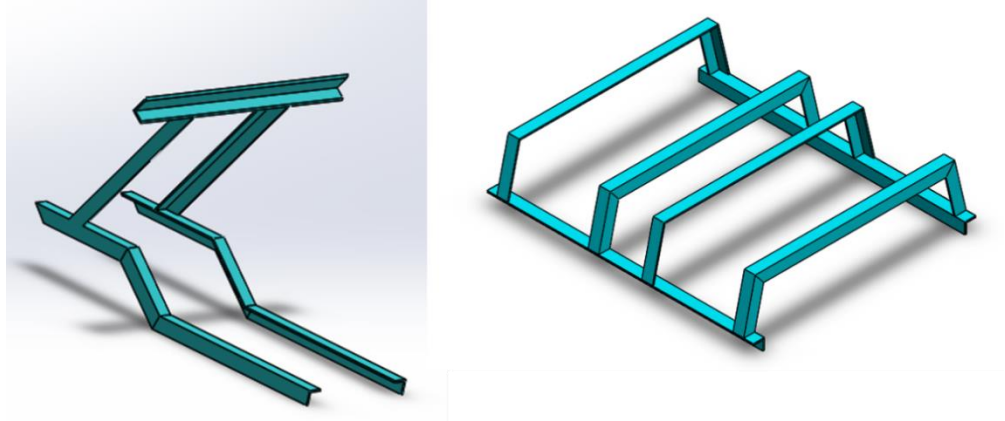
Para el montaje del sistema completo se acondiciono una estructura soldada que estaba en el laboratorio, se retiraron las partes que no funcionaban o interrumpían el montaje, se lijó y pintó como se muestra en la Figura 15. Se le adaptaron refuerzos para darle robustez en la parte superior, lugar que se dispuso para el evaporador 2 y condensador y para la inferior donde se localizó el evaporador uno.

Figura 15. Estructura acondicionada para funcionar como bastidor del sistema.



Estos refuerzos se modelaron, se sacaron los planos y se mandaron a fabricar en ángulo de 1 1/4" x 3/16". También se reforzaron los apoyos del bastidor con un tubo

Figura 16. Refuerzos para el bastidor del sistema hechos en ángulo.



soldado a una platina, donde posteriormente se atornillaron las 4 rodachinas de 100 kg cada una. Dos de las rodachinas se pusieron con freno.

En la Figura 16 se puede observar la forma de los refuerzos antes de ser parte de la estructura. Se aseguraron al bastidor con cordón de soldadura por arco con electrodo revestido.

#### 4.1 CONEXIÓN ENTRE EQUIPOS

**4.1.1 Conexión de intercambiadores.** En la Tabla 10 se presentan los diferentes accesorios necesarios para la conexión entre equipos especificando su tamaño y el lugar donde son utilizados.

La conexión de equipos se dispuso para que funcione en simple efecto y en multiefecto sin tener que modificar más que la apertura o el cierre de algunas válvulas. A la salida del intercambiador 1 se ubicó una T que dispuso dos vías: la directa al intercambiador 2 y la que lleva directo al condensador, si se sigue el camino de esa línea se encuentra la válvula BV1, que es la de servicio en el simple efecto.

Esto no se fijó hasta que se sacó la línea del evaporador 2 que fue la que determinó la altura a la que debían estar las conexiones horizontales, pues dependió del

espacio que ocupó la válvula la unión, la T y los niples entre ellas como lo muestra la figura 17.

Tabla 10. Materiales usados en conectar los dos evaporadores y el condensador.

Cantidad	Pieza	Tamaño [in]
2	Tapa superior	Niple salida de vapor 1 ½
		Niple salida al visor de nivel 1 ¼
		Niple entrada de agua 1 ¼
2	calandria	Niple entrada de vapor 1 ½
		Niple salida de condensado 1"
2	tapa inferior	Niple purga 1"
		Niple salida al visor de nivel 1 ¼
2	Tanque condensado	Niple entrada de condensado 1
		Niple purga de condensado 1
2	Tanque alimentación	Niple salida al evaporador ½
3	Unión universal	Unión 1 ½
3	Válvula de bola	Válvula 1 ½
2	Accesorio T	T galvanizada 1 1/2
3	Codos	Galvanizado 1 1/2
2	Uniones	Uniones 1 ½

Figura 17. Inicio de la conexión entre equipos Evaporador- Condensador.



(se hizo esa conexión con juntas universales por el hecho de que los intercambiadores están fijos y la conexiones son tubería y no manguera). En la salida de la tapa superior del intercambiador 2 se ubicaron: la válvula BV3, unión universal y la segunda T que une los dos efectos. Teniendo los accesorios restantes se toman medidas reales y se mandan a hacer los niples teniendo como referencia esa salida del evaporador 2. Quedo la parte del vapor cerrada como se ve en la figura 18.

**4.1.2 Conexión de intercambiadores a los tanques de condensado.** Los tanques de condensado se mandaron a construir en un tubo de acero inoxidable 304 de 8" Schedule 10s al igual que el cuerpo de los intercambiadores y con tapas en platina de 3/16. se conectaron con niples codos y válvulas de independencia de  $\frac{3}{4}$  de pulgada a las salidas de pulgada de la calandria tanto del evaporador 2 como al condensador.

Figura 18. Montaje de conexiones de tubería entre tanques e intercambiadores.



**4.1.3 Conexión del generador de vapor al sistema de evaporación.** El generador de vapor está conectado a la manguera saliente del regulador en el punto de gas del laboratorio. Se instala una manguera de vapor SAE DN19mm 100 R6 ¾ a la salida del generador como se muestra a la izquierda en la figura 19. La manguera fue conectada a la entrada de vapor del intercambiador 1.

**4.1.4 Conexión de Torre de enfriamiento al sistema de evaporación.** La torre tenía salida de la bomba conectada a otros intercambiadores, se hizo una adaptación para que circule el agua a través de una manguera que entra al niple destinado como purga en la tapa inferior del condensador. La entrada a la torre se hizo a través de otra manguera que sale del niple dispuesto en la parte superior de la tapa del condensador y llega a la parte superior de la torre como se muestra a la derecha de la Figura 19.

Figura 19. Imágenes de la conexión entre equipos de servicio y el Sistema de evaporación.



#### 4.1.5 Conexión de Bomba de vacío al sistema de evaporación.

La bomba de vacío reposó sobre el bastidor del sistema, posee incorporada una manguera y su racor, y se conectó a la adaptación que se hizo con la parte complementaria del racor en los vacuómetros de los dos tanques de condensado. (Izquierda de la Figura 20).

Se compraron e instalaron las mirillas de nivel para cada evaporador con una longitud de 40 centímetros entre centros de los nipples de las tapas véase Figura 8.

Figura 20. Accesorios del montaje.



#### 4.2 PRUEBA DE ESTANQUEIDAD

Teniendo el sistema terminado en su construcción, se presurizó con aire del compresor del taller de la escuela para comprobar la hermeticidad. Ante la cantidad de fugas se tomó la decisión de fijar las roscas que las presentaban, con sellante epóxico.

Figura 21. Imagen de fugas en el sistema de evaporación.



Una vez se confía en la estanqueidad del sistema, se recubrieron los intercambiadores y la tubería con aislante térmico (yumbolon) de 1 centímetro de espesor (véase Figura 22). Se instalan 4 sensores de temperatura con *display* en medio del aislante y la superficie de los intercambiadores.

Figura 22. Aislante térmico y sensores de temperatura.



## **5 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO**

Las pruebas de funcionamiento del sistema de evaporación se desarrollaron una vez finalizadas las pruebas de estanqueidad. Estas buscaban identificar los factores que influían en la producción de vapor así como la respuesta del sistema a las operaciones de carácter transitorio (cantidad de reposición de agua, frecuencia de la reposición, entre otras) con el fin de identificar los diversos factores que afectan el comportamiento de la producción de vapor en los efectos y su respuesta ante las condiciones de operación variable, que se presentan gracias al flujo de vapor, el cual, no es constante y depende de: la cantidad de agua de reposición en el generador, la frecuencia con la que se hace, y del flujo del agua a tratar que tiene las mismas condiciones variables que el flujo de vapor.

Para tal fin, se plantearon una serie de experimentos para cada una de las configuraciones del sistema: simple efecto y doble efecto. En cada configuración, las pruebas se subdividieron en dos condiciones operativas según el nivel de agua en los evaporadores. La primera condición consistía en operar el sistema manteniendo un nivel fijo de volumen de agua en el evaporador primario (volumen constante). Esto implica que la recarga de agua en el evaporador se realizara cada vez que su nivel disminuía un centímetro en el visor (equivalente a 500 ml de agua evaporada). En la segunda condición de operación el evaporador tiene un volumen de agua inicial (8 litros) que se evapora hasta un volumen final (5 litros), momento donde se concluye el experimento (volumen variable). Las pruebas en su totalidad se hicieron con agua potable.

Los parámetros analizados durante las pruebas fueron: presiones, temperaturas y masas de condensado.

### **5.1 SIMPLE EFECTO**

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el tratamiento de agua, funcionando en simple efecto y con un volumen constante de agua en el evaporador

de 6 litros. Durante una hora se evaluó la estabilidad del sistema bajo diferentes condiciones de presión de vacío y se determinaron las masas de condensado. Estas masas corresponden a la recolectada por la condensación del vapor suministrado (fuente de energía) al evaporador principal y la obtenida en el tanque de condensados proveniente del sistema de evaporación en simple efecto, (ver Tabla 11).

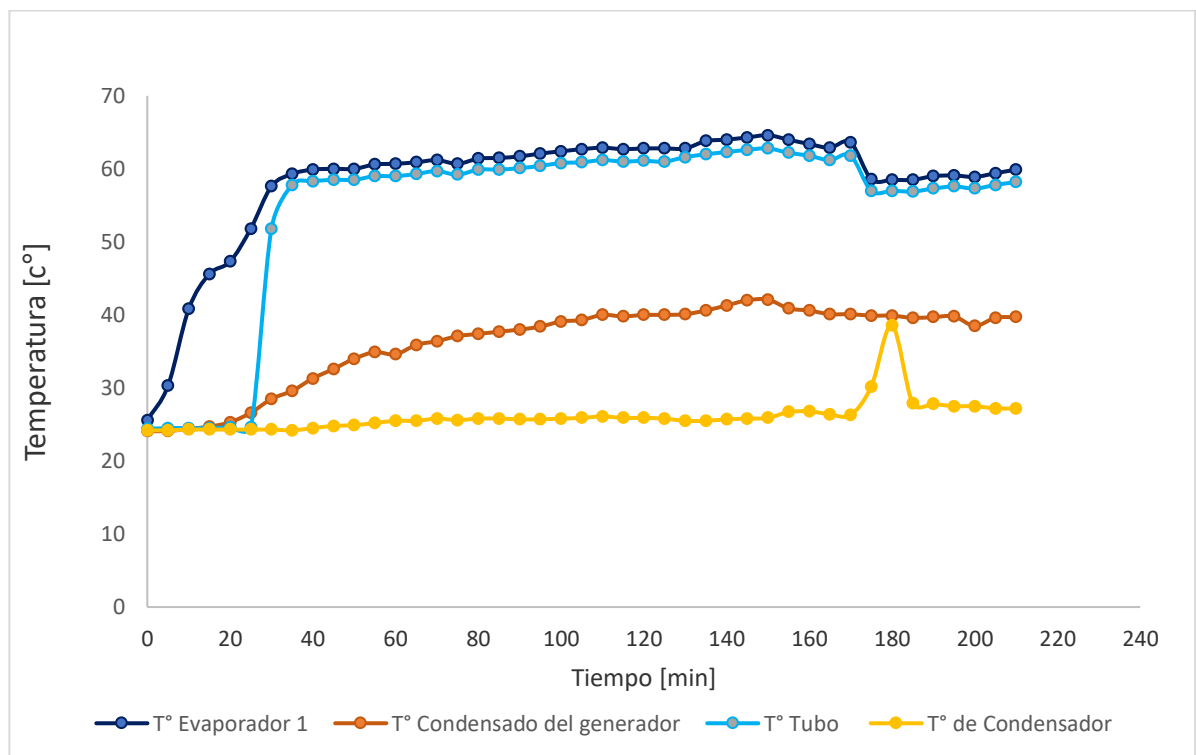
Tabla 11. Efecto de la presión de vacío en los parámetros de funcionamiento del sistema en simple efecto (a 5 litros volumen constante).

Prueba	Presión absoluta [kPa]	Condensado de Generador [kg]	Condensado Interés [kg]	de Rendimiento [%]
1	5,34	2,2	1,8	81,82
2	8,72	2,00	1,90	95,00
3	8,72	1,79	1,51	84,36
4	22,27	1,83	1,47	80,33
5	22,27	2,16	1,31	60,65
6	39,20	2,17	1,25	57,60

Durante el experimento, para mantener el nivel de agua en el evaporador principal con 6 litros, fue necesario realizar múltiples reposiciones de agua cada 500 ml de agua evaporada (representados por 1 cm en el visor). Para el caso de las presiones más bajas, el rendimiento del sistema de evaporación/condensación fue más eficiente y por lo tanto se obtuvieron las mayores masas de condensados. Sin embargo, para garantizar la presión a estos niveles de vacío, fue necesario encender la bomba de vacío en diversas ocasiones. Entre los resultados obtenidos la mayor estabilidad del sistema se presentó para una presión absoluta de 22,27 kPa. Bajo estas condiciones la variabilidad del sistema provocada por la reposición de agua, así como las necesidades para mantener la condición de vacío fueron minimizadas, ver Figura 23.

Teniendo identificadas las condiciones más propicias para el experimento de volumen constante, se preparó la prueba de volumen variable desde 8 litros iniciales en el evaporador principal hasta que por efecto de la evaporación este volumen disminuye hasta 5 litros. De ahí en adelante se repuso agua en volúmenes de 0.5 litros.

Figura 23. Desempeño de las temperaturas en un sistema de evaporación en simple efecto a una presión de 22,27 kPa a un volumen constante de 6 litros en el evaporador principal.



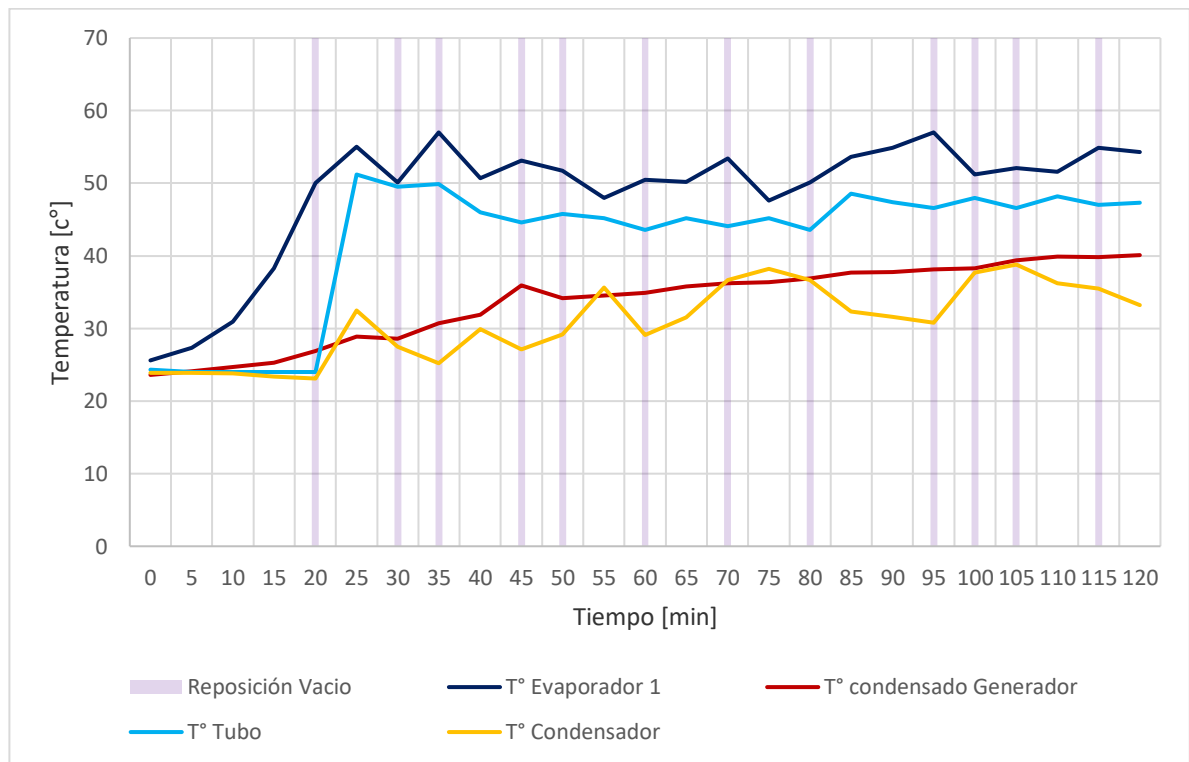
Las pruebas ejecutadas con volumen variable se realizaron para dos niveles de presión, obteniendo las masas de condensado presentadas en la Tabla 12. Estos resultados no presentan divergencias significativas si se comparan con el método de volumen constante. En la Figura 24, se presenta la evolución de las temperaturas medidas durante el experimento a 8,7 kPa, en donde se pueden

identificar los momentos en que fue necesario encender la bomba de vacío para mantener este nivel de presión.

Tabla 12. Experimentos con volumen variable (de 8 litros a 5 litros) y su condensado.

Prueba	Presión absoluta [kPa]	Condensado de Generador [kg]	Condensado de Interés [kg]	Rendimiento
1	8,72	1,857	1,490	0,80
2	22,27	1,590	1,449	0.91

Figura 24. Desempeño de las temperaturas en un sistema de evaporación en simple efecto a una presión de 8.70 kPa ( $P_{\text{vacío}} = 24 \text{ inHg}$ ) a un volumen variable de 8 litros a 5 litros en el evaporador principal.

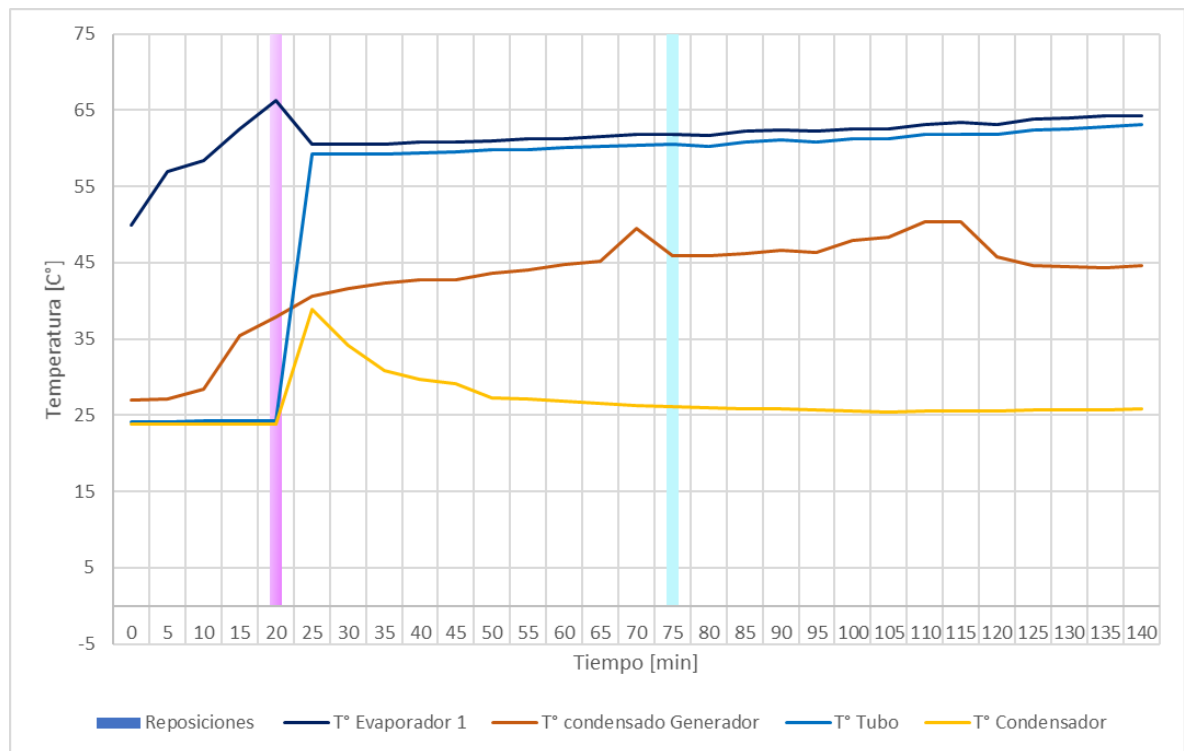


El condensado de agua procesada obtenido en el experimento a 8,7 kPa fue próximo al obtenido a 22,27 kPa. Sin embargo, bajo esta condición, el sistema presentó algunas dificultades operativas. En primer lugar, a 8,7 kPa el sistema presentó una baja estabilidad en su presión, lo cual requirió una mayor frecuencia de uso de la bomba de vacío. En segundo lugar, el sistema presentó un mayor

condensado del vapor de suministro, lo cual es un indicador de un mayor consumo de energía. En consecuencia, hay una evidencia de una menor eficiencia en el funcionamiento dado que se requiere una mayor cantidad de energía neta por kg de condensado de agua procesada.

En la Figura 25 se presenta el comportamiento del sistema operando bajo una presión de 22,27 kPa en la configuración de simple efecto y volumen variable. En este nivel de presión, se evidencia nuevamente una mejor estabilidad en el funcionamiento.

Figura 25. Evolución de temperatura a 22.27 Kpa (P vacío = 20 inHg)

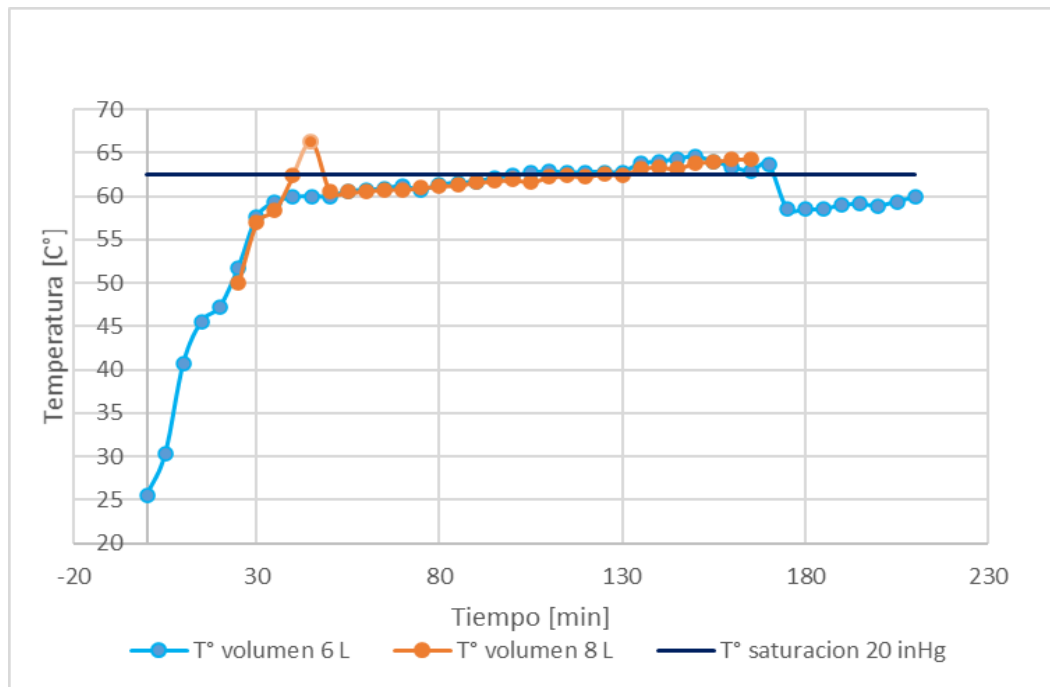


Los experimentos realizados en la configuración de evaporación en efecto simple (o una etapa), mostraron la mejor estabilidad operacional se alcanzó a una presión de 22,27 kPa. El sistema no presentó variabilidad en las masas de condensado de agua procesada, asociadas a la operación en la condición de volumen constante o de volumen variable. El comportamiento de la temperatura en el evaporador

principal con los dos volúmenes (6 litros constantes y 8 litros variables) se evidencia en la Figura 26 donde también se marca la temperatura de saturación para esa presión y coincide con la temperatura media de los dos experimentos.

De acuerdo con Kern<sup>3</sup> en un proceso de simple efecto, se podría obtener hasta 0.9 lb de agua depurada por cada lb de agua suministrada por la fuente de vapor. En las pruebas con mayor estabilidad operacional (22,27 kPa), se obtienen una masa condensada de fuente de suministro igual a 1,59 kg y de masa de depuración de 1,45 kg que nos presenta un rendimiento de 0,91 lo cual coincide con la literatura consultada.

Figura 26. Comportamiento de la temperatura en el evaporador primario para dos condiciones de volumen.



<sup>3</sup> KERN, Donald. Procesos de transferencia de calor. Trigésima primera reimpresión México, 1999 No. 14. p. 448.

## 5.2 MULTIEFECTO

Sabiendo de la literatura que el equipo debe operar en dos presiones distintas para cada efecto, y que la del segundo efecto debe ser menor se empieza a probar con dos presiones cercanas como el experimento en simple efecto. Las pruebas de funcionamiento del sistema de evaporación en la configuración de multiefecto (2 etapas), se realizaron con el objetivo de identificar los niveles de presiones (en cada etapa) que proporcionaban los mejores resultados.

Para ello se establecieron diferentes presiones en la segunda etapa (iniciando con la presión de vacío máxima alcanzada por la bomba de vacío), y se fueron variando las presiones en la primera etapa de evaporación. Para cada pareja de presiones se levantaron los datos de masa de condensado, como se muestra en la Tabla 13. En ella se aprecia el valor del condensado de cada una de las etapas y el condensado del generador en kilogramos medidos en una hora, se puede ver como era de esperarse el condensado producto del vapor del generador es mayor al producido por el primer efecto, dado que al tener una mayor temperatura este condensado posee una entalpía de cambio de fase menor a la entalpía correspondiente al condensado de la primera etapa que se encuentra a menor temperatura, de la misma manera ocurre entre el condensado de la primera etapa y la segunda etapa.

Tabla 13. Rendimiento de los condensados para diferentes parejas de presiones del sistema de evaporación en la configuración de multiefecto (dos etapas).

Prueba	Volumen [L]	Presión absoluta Evaporador 1 [kPa]	Presión absoluta Evaporador 2 [kPa]	Condensado de Generador [kg]	Condensado de Interés [kg]	Condensado de Interés [kg]
1	5	15,49	1,95	4,671	1,50	0,93
2	5	39,20	1,95	5,00	2,16	0,86
3	5	42,59	8,72	3,10	1,66	1,40
4	5	35,81	5,34	1,88	1,04	0,50
5	5	56,13	22,27	2,35	1,30	1,00
6	5	49,37	8,72	1,78	1,08	1,2
7	5	45,97	5,34	1,99	1,33	1,66

Siguiendo lo planteado por Kern<sup>4</sup>, el beneficio de tener dos efectos es: que la suma de los efectos sea representativa sobre el condensado del generador y esto solo ocurre cuando tenemos dos juegos de presiones, las de los experimentos 6 y 7. Se supondría por la Tabla 13 que las presiones deben guardar una proporción y aceleradamente puede pensarse en decir que sería una la mitad de la otra, refiriéndose a la presión de vacío donde las parejas de presiones de los experimentos 6 (12 y 24 inHg) y 7 (25 y 13 inHg) cumplen con esta relación, pero de ser así el experimento 5 (10 y 20 inHg) cumpliría y no lo hace. Finalmente se decide operar las pruebas con las presiones del experimento 7 pues son las de mejor resultado. Las parejas de presiones con buenos resultados, están asociadas a condiciones que funcionan con la capacidad de transferencia de calor de los evaporador-condensadores.

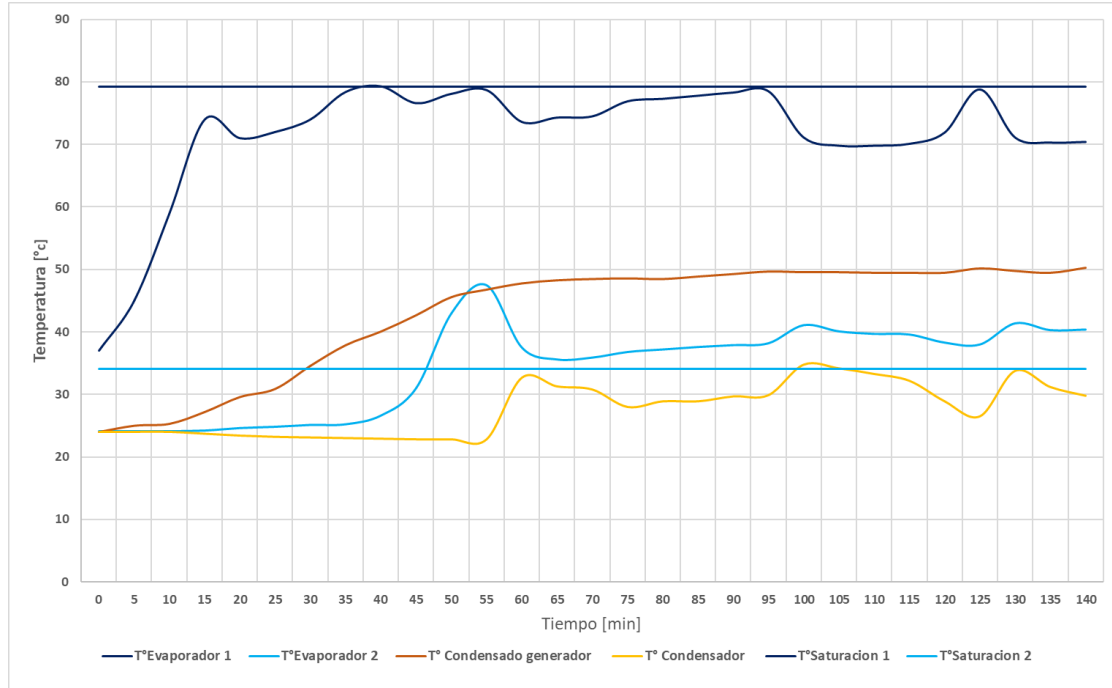
Con condiciones de presión definidas, se dividen de nuevo las pruebas en dos: manteniendo el volumen constante en 5 litros y dejando que el volumen varíe desde 8 litros hasta 5. El comportamiento de las temperaturas para las dos etapas manteniendo el volumen constante se muestran en la Figura 27. En esta se identifican las temperaturas de saturación teóricas que corresponden a las presiones de operación para la primera etapa de 45.97 kPa absoluta (presión de vacío=13 inHg) una temperatura de saturación igual a 79.26 °C y en la segunda etapa una presión de 5.341 kPa (presión de vacío=25 inHg) y una temperatura de saturación de 34.06 °C.

El experimento mostró que hay un periodo de transitoriedad hasta alcanzar un estado de operación permanente y que es de alrededor de 60 minutos. A partir de este momento la estabilidad del sistema se ve únicamente afectada por: las reposiciones de agua (cada 500 ml de agua evaporada), el uso de la bomba de vacío para regular la presión y por las purgas del condensado de agua tratada.

---

<sup>4</sup> KERN, Donald. Procesos de transferencia de calor. Trigésima primera reimpresión México, 1999 No. 14. p. 448.

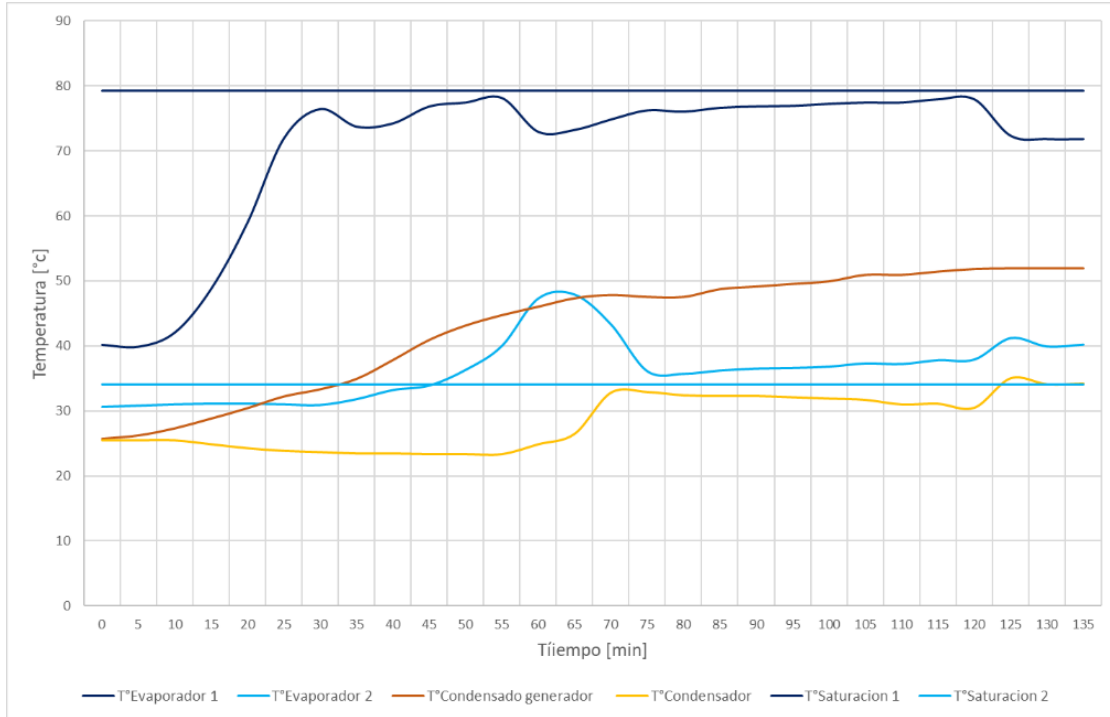
Figura 27. Desempeño de las temperaturas en un sistema de evaporación en doble efecto a una presión de 45.97 [kPa] primer efecto y 5.341 [kPa] en segundo efecto, a un volumen constante de 6 litros en los evaporadores.



Estas acciones se ven representadas por picos transitorios en el diagrama que se estabilizan rápidamente.

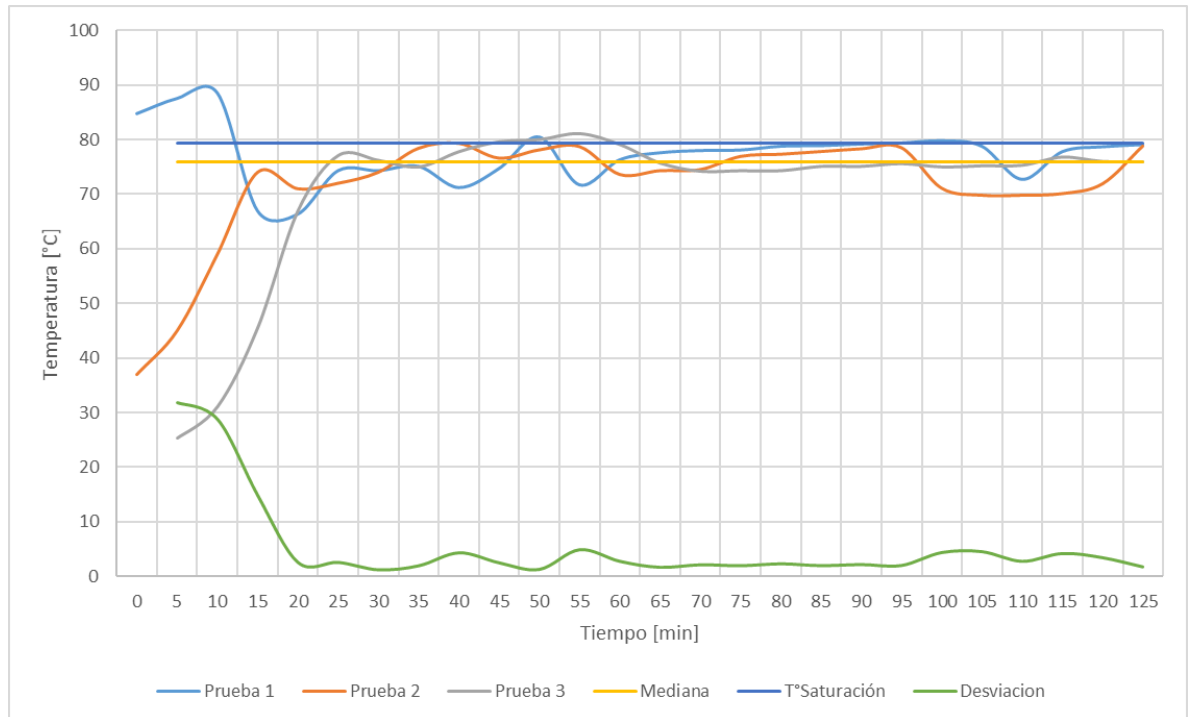
En la Figura 28 se presenta el comportamiento de las temperaturas características del experimento a volumen variable desde 8 a 5 litros. Dado que su volumen inicial de agua es mayor que el experimento anterior (5 litros a volumen constante), su periodo de transitoriedad es más extenso alcanzando 70 minutos. Sin embargo, debido a que no hay reposición de agua su comportamiento es más estable y presenta poca variabilidad. La temperatura del segundo efecto tiene la tendencia a estar por encima de la temperatura de saturación debido a que el vacío que lleva la línea es el máximo posible por efectos de la bomba, mientras que la primera etapa tiene la tendencia a estar por abajo, pues el sistema si puede moverse hacia una presión de vacío mayor, ya sea por exceso de tiempo de reposición o cuando el sistema recupera la presión por la condensación.

Figura 28. Evolución de temperatura a 45.97 Kpa (P vacío = 13 inHg) Primera etapa y 5.341 Kpa (P vacío = 25 inHg) en segunda etapa con volumen variable de 8 litros a 5.



Los experimentos 6 y 7, presentados en la Tabla 13, fueron replicados a fin de verificar su confiabilidad. En la Figura 29 se presentan los resultados obtenidos en cada una de las repeticiones, así como los valores medios y el desvío estándar presentado. Para la prueba de 5 litros volumen constante se tomaron tres experimentos y se plasmaron en la gráfica las tres temperaturas del primer evaporador, se graficó la mediana de esos datos y la temperatura teórica de saturación, se calculó la desviación estándar de los tres datos en cada punto en el tiempo, y se trazó como una serie más para visualizar que tan dispersos están los datos. Esto se observa en la Figura 29.

Figura 29. Comparación de Temperaturas entre experimentos a volumen constante 5 Litros.

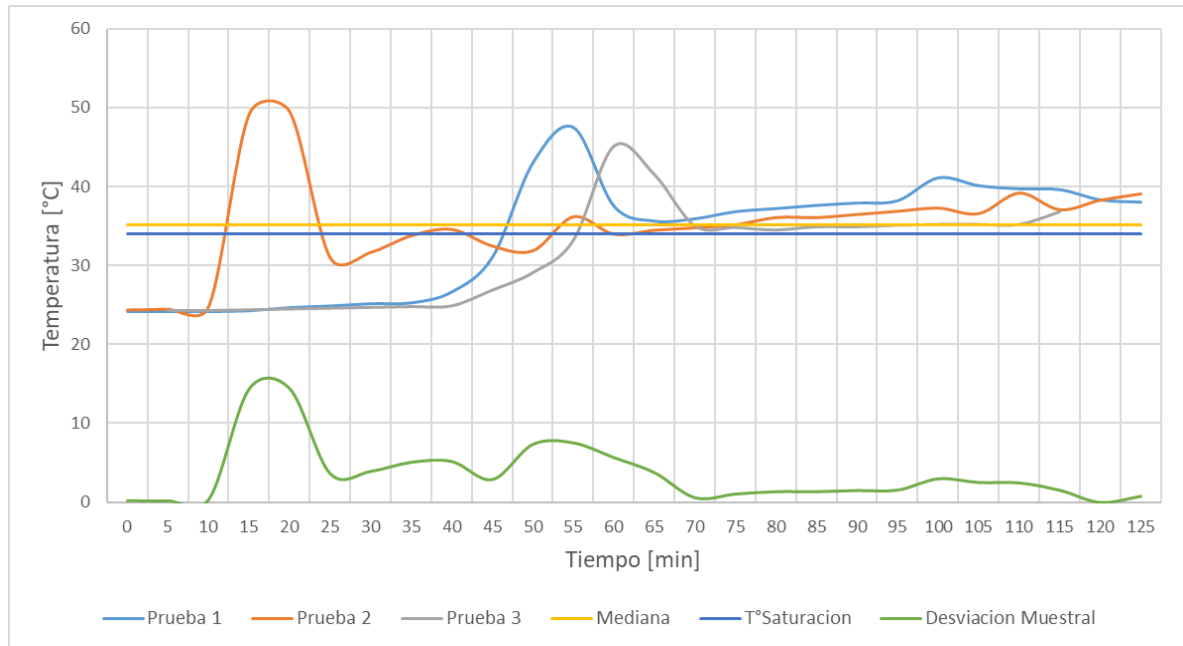


Suprimiendo el comportamiento transitorio de cada experimento, las curvas muestran una convergencia alta, en donde se obtuvo un valor medio de temperatura que oscilo alrededor de 75,95 °C con desviaciones estándar entre 1,19 y 4.88 °C durante un periodo de 100 minutos aproximadamente.

Para el segundo evaporador se realiza el mismo procedimiento y se evidencia en la Figura 30, donde el efecto transitorio abarca un periodo de tiempo mayor, ya que tiene como fuente de energía el vapor que se produce en la primera etapa por lo tanto hasta que no exista producción en el primer efecto el segundo evaporador no elevara su temperatura. Es de acotar que mientras la presión sea constante y la alimentación no se haga muy rápido la temperatura se comportara estable y cercana a la teoría que fue de 34.06 °C y la media experimental de 35,2 °C. Con respecto a la desviación estándar de los experimentos, va reduciendo conforme va haciéndose cuasi estable el proceso en el sistema de evaporación. En los últimos 55 minutos

de prueba la desviación oscilo entre 0°C y 2.99 °C siendo menor a la del evaporador primario.

Figura 30. Comparación de Temperaturas entre experimentos a volumen constante 5 Litros.

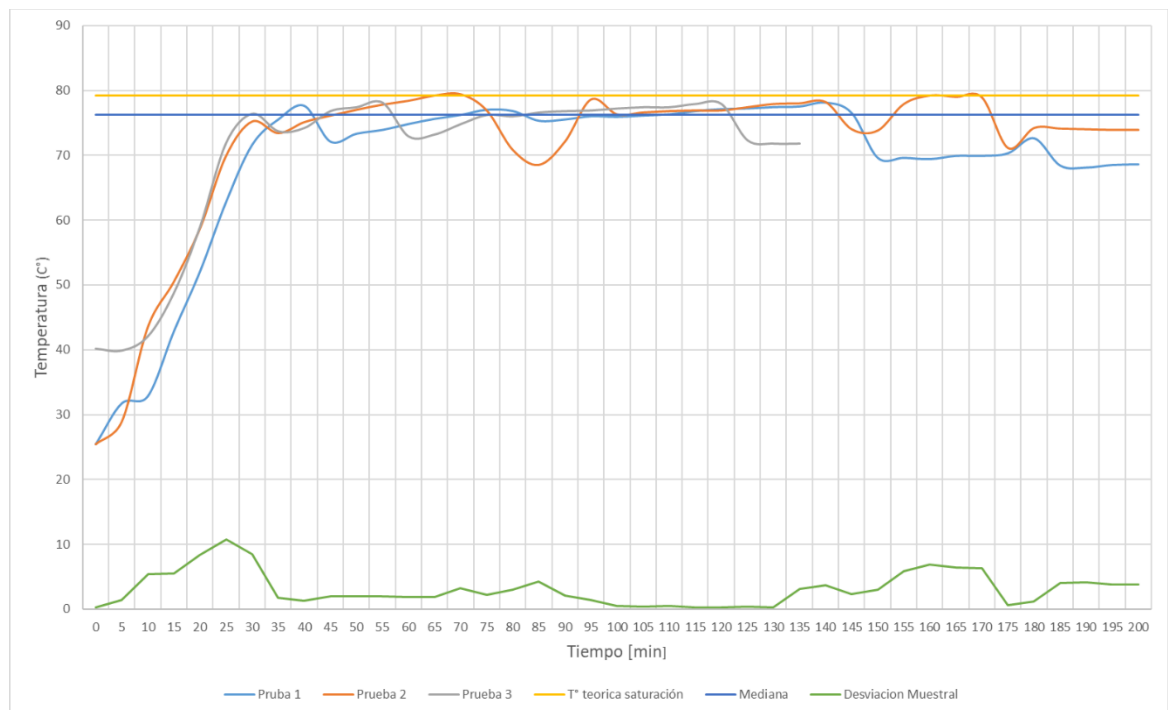


Para las experiencias de volumen variable, varió de 8 litros a 5 litros y los comportamientos son muy similares a mantener un volumen constante. Dos gráficos Figura 31 y 32 representan cada una la trazabilidad de las temperaturas a través del tiempo en los dos evaporadores donde las observaciones fueron muy similares: cuando se supera el estado transitorio la desviación estándar tiende a ser más pequeña, los baches o picos que se pueden presentar se deben en su mayoría a la reposición de vacío o agua, o a las purgas, debido a que estas acciones se realizaron de forma manual y por una sola persona a lo largo de todo el experimento. Las pruebas con volumen variable se pueden desarrollar por más tiempo sin hacer reposición lo cual se ve reflejado en el que haya periodos más estables y cercanos a la teoría. Otros aspectos a tener en cuenta para el análisis de los datos recaudados son: que las mediciones de temperatura son superficiales, los

medidores se encuentran posicionados entre el aislante térmico y la superficie metálica del equipo, de manera que las temperaturas medidas en los termopares deben estar ligeramente por debajo de las del fluido. Las medidas de esas temperaturas no se planearon al interior de los evaporadores es decir directamente en el fluido por dificultades en la hermeticidad del sistema.

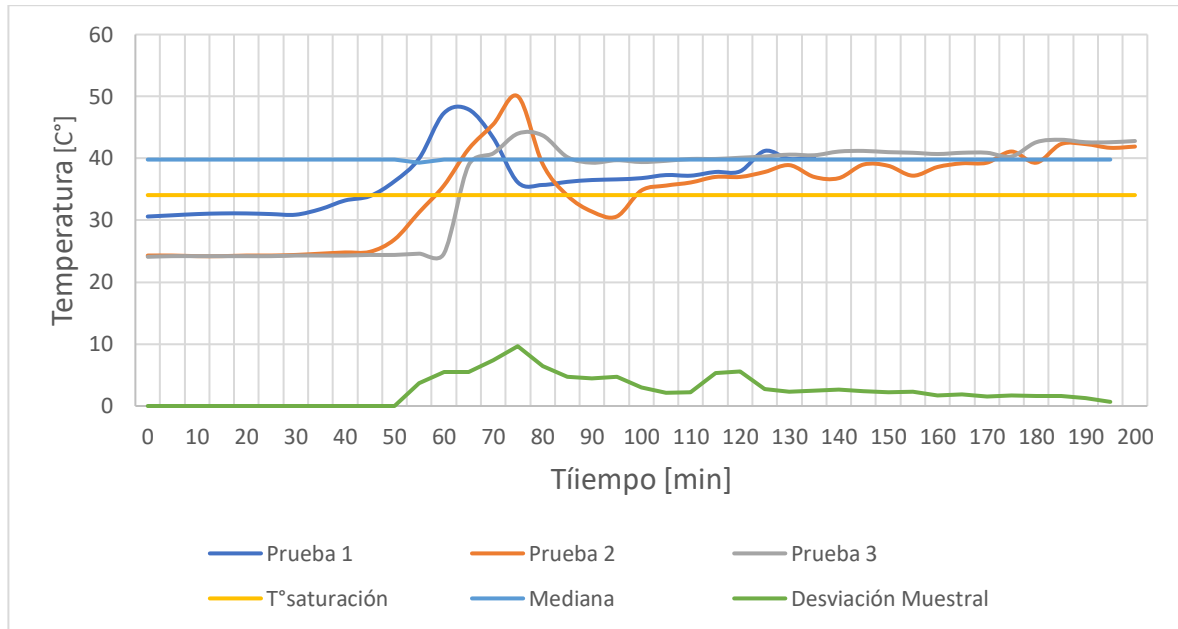
Las mirillas pueden introducir un error asociado a su medida del volumen al interior del evaporador, situación que hace probable el error al tratar de mantener condiciones de nivel y con ello las reposiciones de agua.

Figura 31. Comparación de Temperaturas entre experimentos a volumen variable 8 Litros.



La varianza máxima para el comportamiento de las temperaturas en el primer evaporador fue de 4,20 y 0,25 la varianza mínima en 100 [min] de un estado estable para la prueba de volumen variable.

Figura 32. Comparación de Temperaturas entre experimentos en el segundo evaporador a volumen variable 8 Litros



En el segundo evaporador se presenta 0,63 valor de varianza mínima Figura 32 y varianza máxima 5,62 en 100 [min] de tiempo.

La Tabla 14 muestra la producción de destilado a lo largo de una hora de prueba en periodo cuasi estable, como es de esperar el condensado producto del vapor del generador es mayor que el destilado del primer efecto y este a su vez es mayor que el destilado del segundo efecto en general (en algunos experimentos no fue así estrictamente, pues depende de que se cumplan las mismas condiciones en todos los experimentos) sin embargo, la suma de ambos condensados totales es mayor que el condensado del generador, teniendo así el beneficio del sistema en dos efectos. Al final de esta tabla se tiene el promedio de los condensados por volumen constante y volumen variable, en cada componente del sistema: Generador, Evaporador 1 y evaporador 2, los dos experimentos están cercanos como para decir que uno es mejor que el otro, si se va a el ejercicio académico sería mejor llenar con un volumen mayor al que ocupa el área de transferencia de calor y dejar que evapore ese volumen de diferencia hasta que llegue al límite de los tubos para no

hacer reposiciones, pero si vamos a lo que se necesitaría en la industria es mejor mantener el volumen cercano al relacionado con el área de transferencia de calor así se incrementen las reposiciones de agua porque el resultado de condensado es mayor.

Tabla 14. Producción de condensado por hora en las etapas y el generador.

Prueba	Volumen [L]	Condensado de Generador [kg]	Condensado de Interés 1 [kg]	Condensado de Interés 2 [kg]
1	5	2,225	2,137	1,25
2	5	2,00	2,00	1,75
3	5	1,85	1,50	1,35
4	5	1,97	1,40	1,24
5	5	1,87	1,137	1,22
6	5	1,76	1,22	1,29
7	8	1,90	1,55	1,65
8	8	2,19	1,39	1,00
9	8	1,70	1,10	0,90
10	8	1,91	1,34	1,38
11	8	1,79	1,64	1,55
		Promedio	Promedio	Promedio
	5	1,94	1,56	1,35
	8	1,89	1,40	1,29

Al establecer experimentalmente la productividad del sistema en kJ de energía por litros de condensado en cada una de las configuraciones de operación (un efecto y dos efectos) se obtuvo la energía consumida a través de la ecuación (1). Para el simple efecto el dato fue el de la mejor prueba con masa de generador igual a 1.85 kg. En el cálculo para el doble efecto se usó la masa promedio con volumen constante 1.94 kg, las entalpias ya están establecidas son:  $h_1$  y  $h_2$ .

$$Q = m_g * (h_1 - h_2) \quad (1)$$

En la Tabla 15 se muestran los resultados del consumo de energía para producir condensado en una hora y el consumo energético de producir un litro.

Tabla 15. Consumo de energía por hora. Y para la producción de un litro de condensado

Efecto	Simple	Doble
Energía consumida [kJ/h]	4214.57	4402.95
Masa de condensado [kg/h]	1.49	2.91
Energía para producir un litro [kJ/l]	2828.57	1513.04

## 6 COSTOS

Los costos que se muestran son: los costos de fabricación (costo de construcción de intercambiadores, costo de inversión en accesorios y conexión) y costos de energía (referentes al consumo de energía del equipo es decir al consumo de cada uno de sus componentes en el periodo de tiempo de trabajo). No se tuvo en cuenta: costos de mantenimiento (referentes a una inversión que se debe realizar periódicamente para el buen funcionamiento del equipo), ni los costos de depreciación de los equipos con el paso de los años (pues al tratarse de un equipo que no es rentable, es decir no se puede vender el agua procesada no se llegaría a recuperar la inversión).

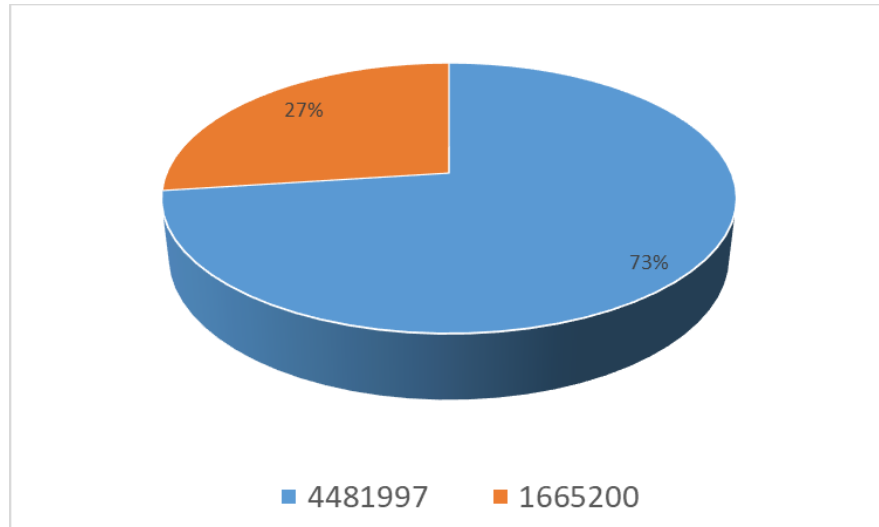
### Costos de fabricación

A continuación, se muestran en la Tabla 15 de forma general los gastos que se asumieron para la construcción del sistema

Tabla 16. Costo de sistema.

<b>Elemento</b>	<b>cantidad</b>	<b>Valor unitario</b>	<b>Valor [pesos]</b>
Maquinado o'ringh	3	30000	90000
Niples	3	69200	207600
Juego de tornillos	3	9600	28800
Válvulas 3/4 y 1"	3	35199	105597
evaporador	3	1350000	4050000
Ruedas	2	13000	26000
Ruedas con freno	2	17000	34000
Refuerzos y pintura	1	150000	150000
válvulas 1" ½	3	44000	132000
Accesorios conexión	1	419200	419200
Juego de visores bronce	2	161000	322000
Vacuo-manómetros	3	60000	180000
Metro aislante	3	14000	42000
Varios	1	360000	360000

Figura 33. Diagrama de porcentaje de gastos fabricación de intercambiadores (73%) gastos de conexión y montaje del sistema (27%).

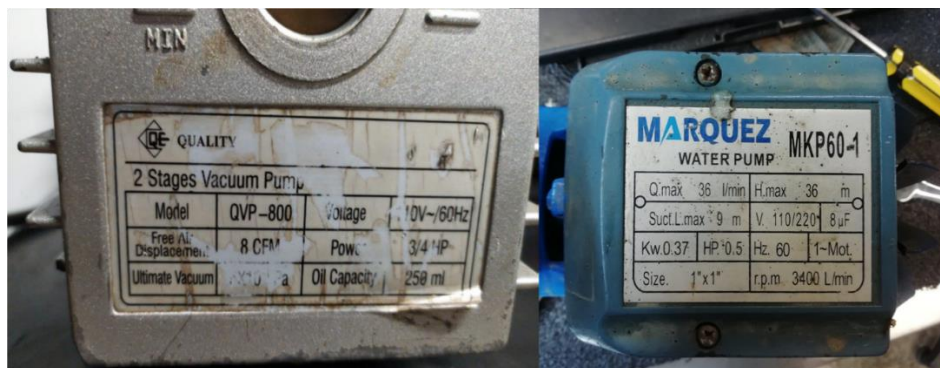


### 6.1 COSTOS DE ENERGÍA

Consumo de energía eléctrica del sistema:

El consumo eléctrico de energía del sistema se restringe a el tiempo en que la bomba de vacío se encuentra encendida, al igual que la bomba de circulación (ver Figura 34) y el ventilador de la torre.

Figura 34. Parámetros de operación teóricos de: la bomba de vacío (izq.) usada para el funcionamiento y la bomba de circulación de agua de la Torre (der.)



Para el cálculo del consumo energético se tomó la tensión y la corriente de la bomba de vacío y de la torre en general, durante una hora en periodos de 10 minutos. se promedió, y ese dato fue el usado para el cálculo. Se planteó la relación que permite saber el consumo energético en función del tiempo de uso de las bombas y el ventilador. Para determinar el costo de operación del sistema, se realizo toma de datos de los valores correspondientes a la corriente y tensión utilizando como herramienta de medición la pinza digital de energía trifásica, ERASMUS; como se muestra en la Figura 35.

Figura 35. Pinza digital de energía trifásica, ERASMUS en medición de corriente de la torre.



El costo de la energía eléctrica por kWh establecido en la ciudad de Bucaramanga por la electrificadora de Santander (ESSA) en el sector industrial en nivel de medida IV es de 459,99[\$/kWh]

Los costos de operación se muestran en la Tabla 16. El producto de los valores de corriente y tensión, representan la potencia instantánea consumida por la bomba. y la torre. De esta forma se dividió entre mil y se dejó la expresión en función del tiempo

Tabla 17. Costos de operación del equipo por periodo de tiempo (1 hora).

	<b>Corriente (A)</b>	<b>Tensión (v)</b>	<b>Potencia (w)</b>	<b>Valor kW (pesos)</b>	<b>valor kWh</b>
Bomba Vacío	8,34	110	917,4	459.99	421.99
Bomba- Ventilador Torre	3,40	110	374	459.99	172.22

#### Consumo de energía gas natural

Si bien el recurso se usó para la fuente de vapor, previamente se aclaró que este servicio tenía como fin simular lo que en un proceso industrial sería un vapor de desecho o también llamado el calor residual. Este costo no se contaría en caso de un prototipo aplicado en una planta pues, la propuesta es que ese calor sea reutilizado.

Para dejar consignado el costo total de producir destilado en el laboratorio, se tomó el dato de inicio y fin de las pruebas en el registro de gas de la escuela, como se evidencia en la Figura 36. Teniendo el tiempo de duración de las pruebas se estimó el gasto de medio metro cubico por tres horas. Para sacar el gasto por la unidad de tiempo equivalente a los otros gastos se muestra la Tabla 17.

Figura 36. Variación en el registro de gas natural de la Escuela de ingeniería mecánica al iniciar y finalizar la prueba.



Tabla 18. Valor de un metro cubico de gas por unidad de tiempo.

	Medida (m <sup>3</sup> )	Tiempo (h)	Valor (pesos)
Gas	1		1381
natural	0,5	3	690,93
	0,166	1	229,39

El valor de una hora de operación del sistema se sacó sumando el valor de mantener encendida la bomba de vacío 5 minutos, una hora de bomba de circulación de agua de la torre y ventilador y una hora de consumo de gas del generador de vapor como se muestra en la Tabla 18.

Tabla 19. Costo de operación de equipo por hora.

	Costo	Tiempo (hora)
Gas natural	229,39	1
Bomba de vacío	35,16	0,083
Torre	172,22	1
TOTAL	436,77	1

## 6.2 RELACIÓN COSTO-BENEFICIO

Para determinar la relación costo-beneficio se estableció cuál es el beneficio del equipo y el costo de obtener ese beneficio. Se debe tener presente si el beneficio es tangible o intangible, debido a que cuando el beneficio es tangible se hace un análisis por medio de la tasa de retorno, pero al ser un beneficio intangible se realizó teniendo en cuenta el parámetro de funcionamiento del equipo, en este caso, el líquido condensado. Con lo anterior se establece el beneficio como la cantidad de agua condensada respecto al tiempo y el costo como el consumo energético en el mismo periodo de tiempo, es decir:

$$\frac{C}{B} = \frac{\text{Costo energia consumida en el mismo periodo de tiempo}}{\text{Liquido condensado en periodo de tiempo}}$$

$$\frac{C}{B} = \frac{436.77}{2.99} = 145.59 \left[ \frac{\text{pesos}}{\text{litro}} \right]$$

## 7 CONCLUSIONES

Se diseñó, construyó e implementó un sistema multiefecto (2 etapas) para el tratamiento de agua por vaporización, utilizando como fuente de energía la salida de un generador de vapor en el laboratorio. El equipo tiene una capacidad de tratar 60 l/h de agua con base a los modelamientos termodinámicos y de transferencia de calor. Consiste en dos evaporadores-condensadores los cuales funcionan como productores de destilado del sistema, un condensador que se encarga de condensar el vapor destilado generado en los efectos, tres tanques de condensado encargados de recolectar el destilado (del generador de vapor y el generado en los efectos) y permitir la conexión de la bomba de vacío, una bomba de vacío que permite retirar el aire del interior de los evaporadores-condensadores, un par de tanques utilizado para la alimentación de agua a tratar en el sistema y un sistema manual-visual de control de nivel encargado de la reposición de agua a tratar dentro de los evaporadores-condensadores.

Se determinó experimentalmente la productividad del sistema en litros de condensado por kJ de energía utilizada en cada una de las configuraciones de operación. Para el simple efecto se requiere de 2828.57 [kJ] para la producción de un litro de agua tratada y en multiefecto 1513.04 [kJ].

Se determinó el costo específico de producir un litro de agua depurada con este sistema en el laboratorio el cual fue de 145.54 [pesos/litro] en la disposición de multiefecto.

Se desarrolló un manual de operación para cada una de las experiencias (simple efecto y multiefecto) el cual se encuentra disponible en la sección de anexos como Anexo A.

Se identificaron los factores más influyentes que afectan la producción y calidad de los condensados como lo son: el caudal del vapor, efecto de la reposición de agua, el nivel de agua en los evaporadores y el nivel de vacío en el sistema.

Se evidencio que el sistema está limitado, tanto por la fuente de calor como por el sistema de refrigeración; puesto que la producción de vapor con la que se estimó el diseño no se logró en el laboratorio, y la limitación de la torre de enfriamiento al no lograr un delta de temperatura amplio, tendría que hacer el retiro del calor a través de masa, lo que implica un condensador casi 5 veces más grande.

Se encontró una condición específica para la operación del sistema. Las presiones de vacío, cumplen con una relación, no solo debe ser menor por cada efecto, sino que hay una pareja de presiones que funcionan para las características de área de transferencia y tamaño de los evaporadores.

## **8 RECOMENDACIONES**

Se recomienda para futuras mejoras tener un control de nivel exacto que permita mejorar la calidad de los condensados, ya que evita que exista el error humano en el momento de hacer reposiciones del agua a tratar, ya que las válvulas no son precisas y los visores de nivel no son fiables debido a que el líquido en el sistema ocasiona turbulencia por la vaporización la diferencia de presiones o en un futuro si se trata agua residual por la formación de espuma debido a los contaminantes del agua.

Para un aprovechamiento idóneo del sistema se debería alimentar con una fuente de calor más potente, ya que si no se obtuvieron mejores resultados es por la limitante del flujo másico del vapor.

## BIBLIOGRAFIA

- ALIANZA POR EL AGUA. Estanque de aireación. [En línea]. Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento. (Recuperado el 26 septiembre 2019). Disponible en: <http://alianzaporelagua.org/Compendio/tecnologias/t/t4.html>
- ASME, 1983 ASME Boiler and Pressure Vessel Code, USA, 1983. Sección Segunda y Octava.
- CENGEL, Y. Y BOLES, M, Termodinámica. México: McGraw- Hill, 2011. Pp. 737-759, Pp.219-254.
- CENGEL, Y. Y BOLES, M, Transferencia de calor y Masa. México: McGraw- Hill, 2011. Pp. 795-838, Pp.629-667.
- CONSEJO NACIONAL DE POLÍTICA ECONÓMICA Y SOCIAL CONPES 3948, Bogotá, D.C., 14 de noviembre de 2018. [consultado el 12 de julio de 2020].
- ERNEST, U, Heat exchanger design handbook. USA: Hemisphere, 1976. Capítulo 1 al 4.
- GARCIA, Julian Y. SILVA, Wilmer. Diseño de un prototipo de un sistema térmico para el tratamiento de las aguas residuales de la planta de harinas de avidesa mac pollo s.a., mediante el aprovechamiento del vapor de desecho de la etapa de cocción de los subproductos del beneficio de pollos. Proyecto de grado, ingeniero mecánico. Bucaramanga: Universidad industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicomecánicas. Escuela de ingeniería mecánica, 2020. pp. 48-87.
- KERN, Donald, Procesos de transferencia de calor: McGraw- Hill, 1999. Pp 213-448.

## ANEXOS

### Anexo A. Manual de operación

#### Introducción

Este documento tiene como propósito aclarar la operación del banco de laboratorio de evaporación por etapas, posee gráficos, tablas, descripción y comentarios para facilitar la comprensión.

La buena interpretación del manual y la juiciosa operación brindará seguridad a los usuarios, al sistema de evaporación y a los otros equipos que prestan servicio.

#### Descripción

El sistema de evaporación está compuesto por tres intercambiadores de calor tipo calandria, uno que hará la función de condensador y otros dos que harán de evaporadores, tres tanques de condensado uno para el condensado del generador de vapor y los demás para el condensado de interés en cada etapa. El sistema de conexión entre intercambiadores consta de tubería y accesorios de  $1\frac{1}{2}$  pulgadas.

El sistema de evaporación contempla, la operación en dos etapas y en efecto simple; las Figura 1 facilita la visualización del sistema global con sus equipos de servicio, la Figura 3 y 5 los modos de operar en simple efecto y en multiefecto (2 etapas).

En la Tabla 1 se mostrará la lista de elementos relevantes del sistema como guía para entender la abreviatura de ellos, a lo largo del manual.

#### Antes de la operación.

Equipos que deben estar disponibles:

Bomba de vacío

Generador de vapor

Torre de enfriamiento

Sistema de evaporación

Verificar: El suministro de gas, suministro de agua para el generador de vapor y el nivel en el visor del mismo, el nivel de la piscina de la torre (superior al orificio de entrada a la bomba) funcionamiento del ventilador y la bomba.

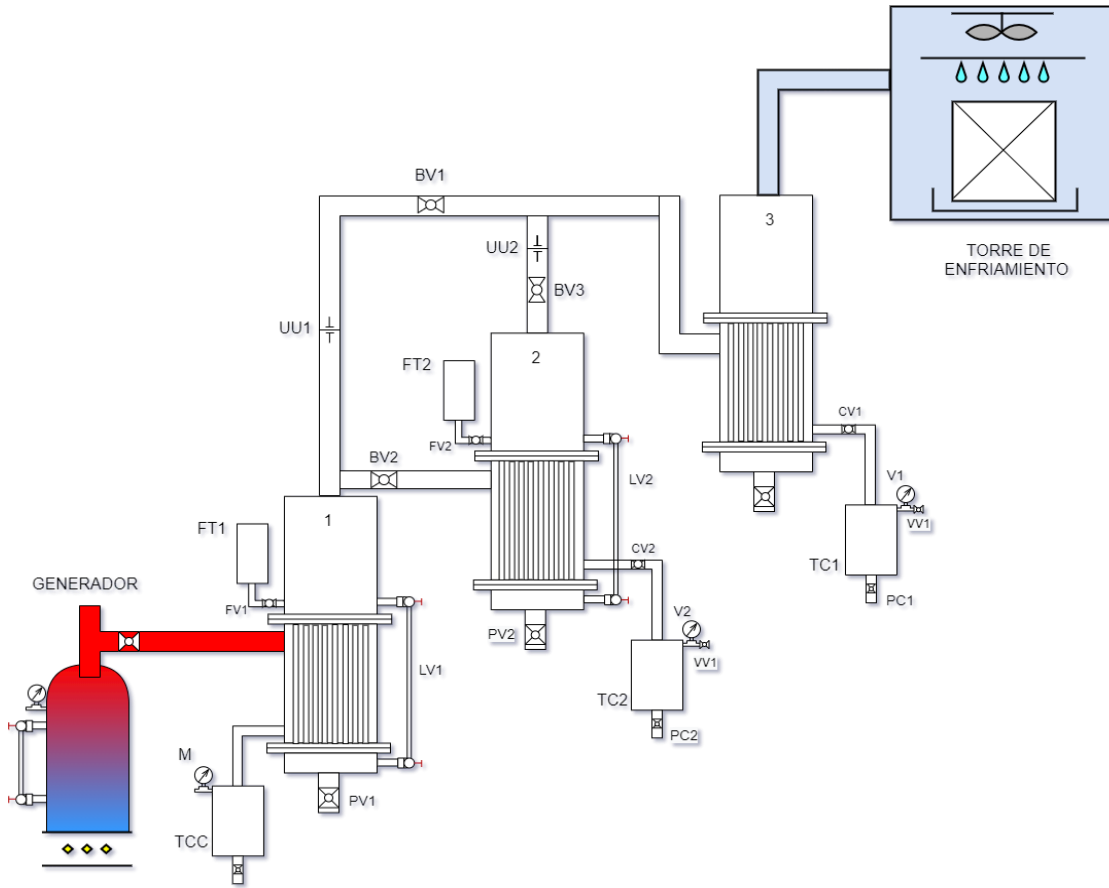
### Encendido del generador de vapor

Se da apertura a la llave de paso del suministro de gas para el laboratorio. Introducir en la parte inferior del generador la chispa (encendedor) y abrir la válvula del generador para el encendido del piloto. Se mantienen las válvulas abiertas, se verifica que la manguera de conexión del generador este bien conectada a la entrada del primer evaporador del sistema. Generará vapor a los 40 min si el nivel esta al ras del visor.

Tabla 1. Elementos del sistema

Elemento	Descripción
BV1	Válvula de bola al servicio de primera etapa 1'1/2
BV2	Válvula de bola al servicio de segunda etapa etapa 1'1/2
BV3	Válvula de bola al servicio de segunda etapa 1'1/2
CV1	Válvula de condensado primera etapa 3/4'
CV2	Válvula de condensado segunda etapa 3/4'
VV1	válvula al servicio de bomba de vacío 1/4'
VV2	válvula al servicio de bomba de vacío 1/4'
PCV	Válvula de purga de tanque de condensado del Generador
PV1	Válvula de purga evaporador 1
PV2	Válvula de purga evaporador 2
PC1	Purga de condensado 1
PC2	Purga de condensado 2
UU1	Unión Universal 1'1/2
UU2	Unión Universal 1'1/2
FT1	Tanque de alimentación en función del primer evaporador
FT2	Tanque de alimentación en función del segundo evaporador
FV1	Válvula de alimentación evaporador 1
FV2	Válvula de alimentación evaporador 2
TCC	Tanque de condensado de Generador
V1	Vacuometro de succión de línea de vapor (1 ER y 2 SEG etapa)
V2	Vacuometro de succión de línea de vapor (2 SEG etapa)
M	Manómetro de tanque condensado del Generador
LV1	Visor de nivel del evaporador 1
LV2	Visor de nivel del evaporador 2

Figuras 1. Sistema global conexión a los equipos de servicio.



### Sistema de evaporación al vacío

El equipo tiene dos maneras de ponerse en marcha, usando un solo evaporador y el condensador (1 Etapa) y utilizando dos evaporadores y el condensador (2 Etapas) se describirá el procedimiento para ambos.

### **UNA ETAPA**

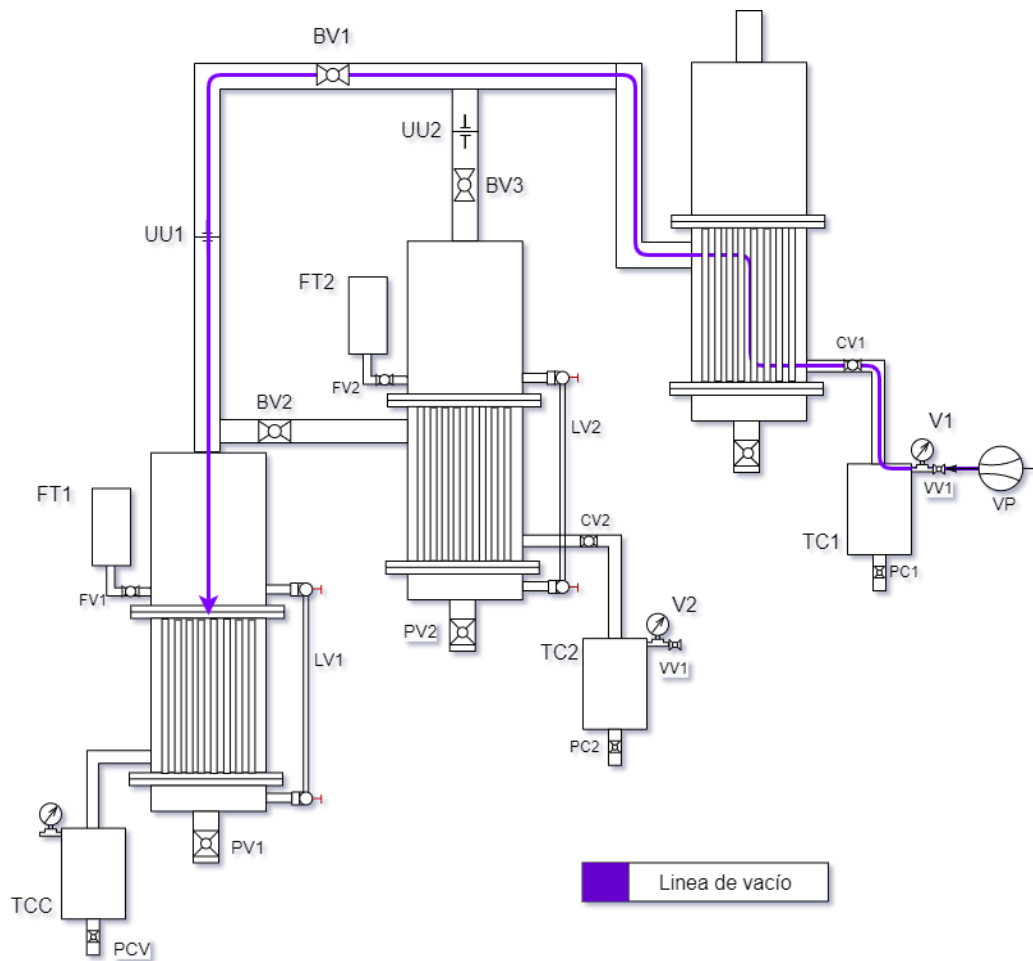
Sistema de vacío:

En la Tabla 2 se muestra el estado de las válvulas para iniciar. Se conecta la bomba de vacío a VV1 a través de un racor y se observa el vacuómetro V1 hasta que al pasar el tiempo se llegue a la presión requerida, se cierra VV1 y se apaga la bomba, no se requiere retirar la bomba por si se desea realimentar vacío. En la figura 2 se observa el recorrido del vacío a través del sistema.

Tabla 2. Estado de válvulas para operar en primer efecto.

ESTADO DE OPERACIÓN DE LAS VALVULAS EN 1 ETAPA	
PCV	ABIERTA
PV1	CERRADA
FV1	CERRADA
BV1	ABIERTA
BV2	CERRADA
BV3	CERRADA
CV1	ABIERTA
PC1	CERRADA
VV1	CERRADA

Figura 2. Ubicación de bomba y línea de vacío Primera Etapa



-Alimentación del agua a tratar en el sistema

Para la primera etapa se tiene el tanque de alimentación FT1 con capacidad de 2 litros, marcado internamente cada 0.5 litros, se llena a su máxima capacidad y se va abriendo la válvula FV1 lentamente hasta llegar al nivel de agua deseado teniendo en cuenta no dejar entrar aire al sistema ya presurizado (preferiblemente solo introducir un litro, cerrar la válvula, llenar de nuevo el tanque y repetir el proceso hasta tener en el interior del evaporador la cantidad de agua deseada para tratar) se va confirmando el llenado del evaporador 1 con la ayuda del visor de nivel LV1 que tiene visualización hasta completar 5 litros. Se deja FV1 cerrada y se espera a que el vapor caliente el agua hasta su punto de ebullición.

Encendido de la torre

La torre se enciende una vez la temperatura del condensador nos marque una mayor al ambiente, pues esto representa la llegada del vapor al condensador.

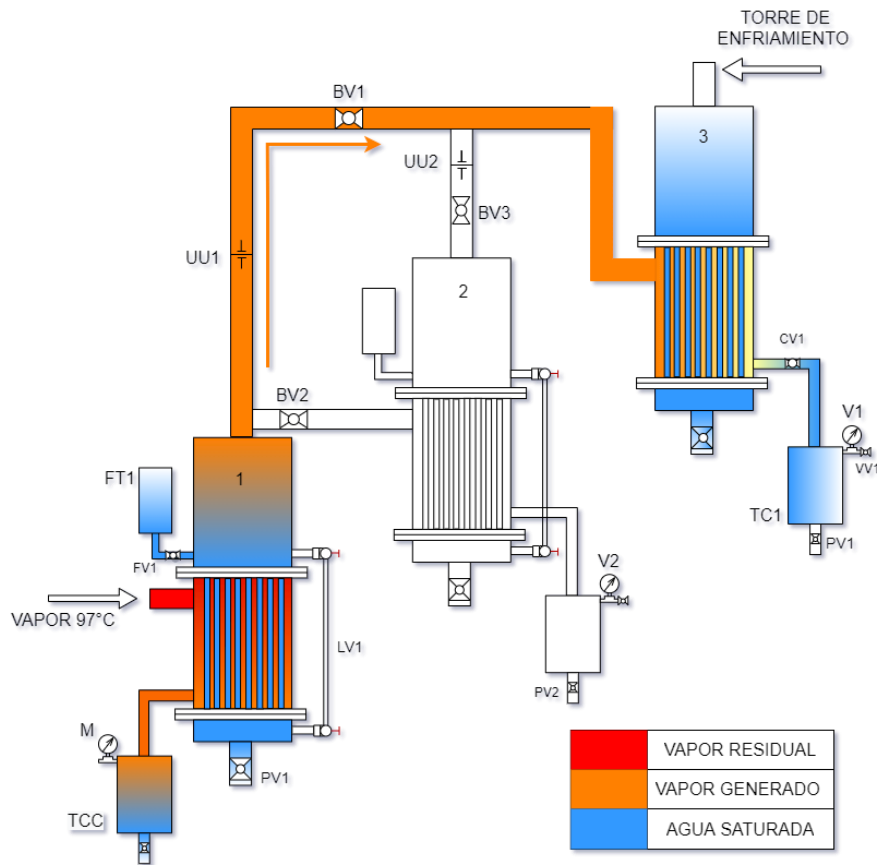
Realimentación y purga

Cuando el estado transitorio termine o el nivel haya bajado y se desee llegar a un nivel estimado se deja el tanque FT1 lleno y se abre lentamente FV1, se observa la cantidad de reposición con los puntos marcados al interior del tanque, se cierra FV1 posiblemente haya que hacer reposición de vacío, se detalla la observación en el V1 y si la presión no es la deseada se cierra CV1 que es la válvula que independiza el tanque del sistema y se abre VV1, se repone la cantidad de vacío para que tenga la presión de trabajo y se cierra VV1.

Finalizada la prueba

Una vez se finaliza la toma de datos cerramos el registro de gas de la escuela enseguida la válvula del piloto del generador de vapor, se apaga y desenergiza la torre de enfriamiento, se desenergiza la bomba de vacío, se abre FV1 se localizan los recipientes en PV1 y en PC1 para purgar el Evaporador 1 y el tanque de condensado. En la Figura 3 se identifican los elementos señalados y la representación del recorrido del vapor para el sistema funcionando en una sola etapa.

Figura 3. Primera Etapa, alimentación y vapor en el sistema.



## DOS ETAPAS

Sistema de vacío:

Para el doble efecto se deben posicionar las válvulas en determinada condición, estas se muestran en la Tabla 3, posteriormente se conecta la bomba de vacío a VV1 y se observa en vacuometro V1 hasta lograr la presión máxima que permite el sistema o al estado que se quiera trabajar de acuerdo al experimento en la Etapa 2, se cierra VV1 se apaga la bomba y se desconecta.

Para pasar la extracción a la Etapa 1 se tiene en este caso al servicio la válvula VV2, se presuriza a una presión de vacío menor a la de la Etapa 2 (definida también según el experimento) y una vez logrado se cierra VV2 y se apaga la bomba.



### Alimentación del agua a tratar en el sistema

La alimentación de las dos etapas se hace en paralelo a través de dos tanques FT1 y FT2 cada uno con una capacidad de 2 litros (marcados internamente con intervalos de 0.5 litros) se llenarán con toda la capacidad y se irán abriendo las válvulas FV1 y FV2 suavemente para permitir el ingreso del agua a tratar teniendo en cuenta no dejar entrar aire al sistema ya presurizado (preferiblemente solo introducir un litro, cerrar la válvula, llenar de nuevo el tanque y repetir el proceso hasta tener en el interior de los evaporadores la cantidad de agua deseada).

Se va confirmando el llenado de los evaporadores con la ayuda de los visores de nivel LV1 y LV2 que tiene visualización hasta completar 5 litros. Se deja FV1 y FV2 cerradas y se espera a que el vapor caliente el agua hasta su punto de ebullición en la Etapa 1 primero y posteriormente la Etapa 2.

### Encendido de la torre

La torre se enciende una vez la temperatura del condensador nos marque una mayor al ambiente, pues esto representa la llegada del vapor al condensador.

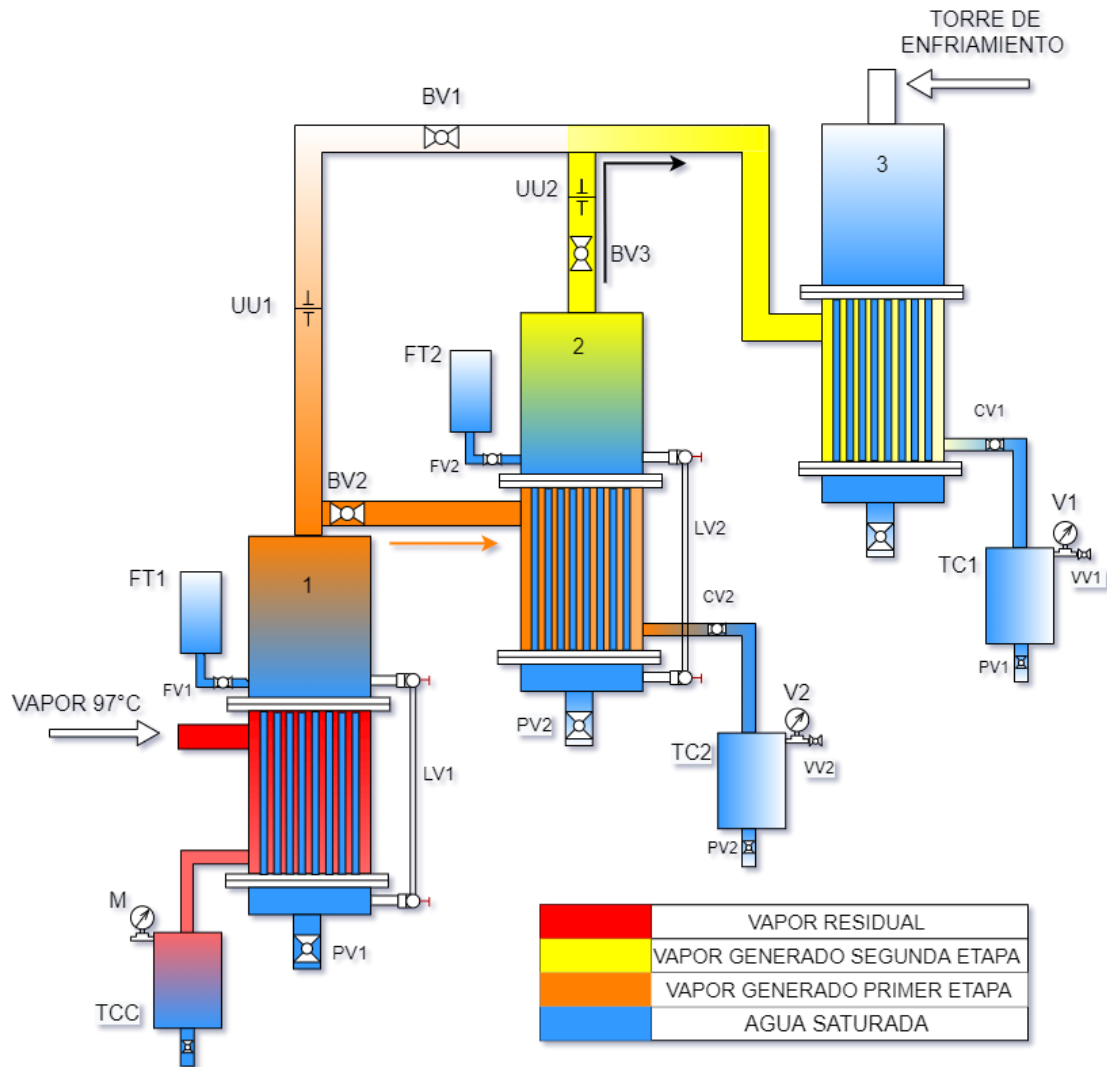
### Realimentación y purga

Cuando el estado transitorio termine o el nivel haya bajado y se desee llegar a un nivel estimado se deja el tanque FT1 lleno y se abre lentamente FV1, se observa la cantidad de reposición con los puntos marcados al interior del tanque, se cierra FV1. Posiblemente haya que hacer reposición de vacío, se detalla la observación en el V1 y si la presión no es la deseada se cierra CV1 que es la válvula que independiza el tanque del sistema y se abre VV1, se repone la cantidad de vacío para que tenga la presión de trabajo y se cierra VV1. De igual manera se hace para la otra línea de vacío donde se involucran VV2, CV2 y PC2, si se desea purgar se aíslan las líneas con CV1 y CV2 se abre VV1 y VV2 se deja salir el condensado por PC1 y PC2 se recoge en recipientes para posteriormente medir al igual que la purga del tanque de condensado TCC del generador de vapor.

Finalizada la prueba

Una vez se finaliza la toma de datos se cierra el registro de gas de la escuela enseguida la válvula del piloto del generador de vapor, se apaga y desenergiza la torre de enfriamiento, se desenergiza la bomba de vacío, se abre FV1 y FV2 se localizan los recipientes en PC1 y PC2 para purgar las Etapas 1 y 2, abriendo VV1 y VV2 del tanque de condensado. En la Figura 5 se identifican los elementos señalados y la representación del recorrido del vapor para el sistema funcionando en dos etapas. Por PV1 Y PV2 se purgan los evaporadores.

Figura 5. Dos Etapas, alimentación y vapor en el sistema.



## Anexo B. Cálculos

### "DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SISTEMA DE EVAPORACION MULTIEFECTO (2 ETAPAS) TIPO BANCO DE PRUEBAS USANDO CALOR RESIDUAL (O DESECHO) PARA EL LABORATORIO DE SISTEMAS TÉRMICOS"

"Datos de entrada"

"Presión y Temperatura estándar"

$P_{amb} = 91$  "Presión atmosférica de Bucaramanga en KPa"

$T_{amb} = 23$  "Temperatura de entrada del agua de alimentación"

"Presiones del sistema en primera y segunda etapa"

$P1 = P_{amb} - P_{vac1}$

$P2 = P_{amb} - P_{vac2}$

"Si se analiza las tablas se verá que entre menor sea la presión en la segunda etapa se maximizará el condensado total, esta presión está dada por la capacidad de la bomba"

$P_{vac2} = 80$

"Temperatura de entrada y salida del vapor de la caldera"

$T1 = T_{sat}(\text{Water}; P = P_{amb})$

$T2 = T1$

"Temperatura de entrada del agua de alimentación"

$T3 = T_{amb}$

$T7 = T3$

"Temperatura de salida del vapor de la primera etapa y del condensado"

$T4 = T_{sat}(\text{Water}; P = P1)$

$T5 = T4$

"Temperatura del vapor de la segunda etapa y del condensado"

$T6 = T_{sat}(\text{Water}; P = P2)$

$T8 = T6$

"Temperatura de entrada y salida de la torre de enfriamiento"

$T9 = T_{amb}$

$T10 = 25$

"Entalpia de entrada del vapor de la caldera"

$h1 = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T = T1; x = 1)$

*"Entalpia de salida del vapor de la caldera"*

$$h2 = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T = T1; x = 0)$$

*"Entalpia de entrada del agua de alimentación"*

$$h3 = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T = Tamb; P = P1)$$

*"Entalpia del vapor de salida de la primera etapa"*

$$h4 = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T = T4; x = 1)$$

*"Entalpia del condensado de la primera etapa"*

$$h5 = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T = T4; x = 0)$$

*"Entalpia del vapor de la segunda etapa"*

$$h6 = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T = T6; x = 1)$$

*"Entalpia del agua alimentación segunda etapa"*

$$h7 = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T = Tamb; P = P2)$$

*"Entalpia del condensado segunda etapa"*

$$h8 = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T = T6; x = 0)$$

*"Entalpia de agua de la piscina de la torre"*

$$h9 = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T = T9; P = Pamb)$$

*"Entalpia de agua de la entrada de la torre"*

$$h10 = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T = T10; P = Pamb)$$

*"Relacion entre las masas de condensado que se obtienen de cada etapa y la masa de la caldera y masa total"*

$$rel1 = mw1/mc$$

$$rel2 = mw2/mc$$

$$mtotal = mw1 + mw2$$

$$mtotalh = mtotal * 3600$$

$$mtotalh = 60$$

*"Balance del primer Intercambiador de Calor"*

$$Q1 = mc * (h1 - h2)$$

$$Q1 = mw1 * (h4 - h3)$$

*"Analisis de Transferencia de Calor del Intercambiador de Calor 1"*

$$Q1 = U1 * A1 * \text{Delta}T1$$

$$\text{Delta}T1 = (d1 - d2)/\ln(d1/d2)$$

$$d1 = T1 - T3$$

$$d2 = T2 - T4$$

*"Planteamiento de resistencias térmicas para encontrar U del primer Intercambiador de Calor"*

$$R_{total1} = R_{int1} + R_{cd1} + R_{ens1} + R_{ext1}$$

$$R_{total1} = 1/(U1 * A1)$$

$$R_{int1} = 1/(h_{int1} * A_{int1})$$

$$R_{cd1} = \ln(d_{ext}/d_{int}) / (K_{mat} * 2 * \pi * Lic * n_{tubos})$$

$$R_{ext1} = 1/(h_{ext1} * A1)$$

$$R_{ens1} = f_{in}/A_{int1} + f_{ext}/A1$$

*"Datos para las resistencias del primer Intercambiador de Calor"*

$$A1 = \pi * d_{ext} * Lic * n_{tubos}$$

$$A_{int1} = \pi * d_{int} * Lic * n_{tubos}$$

*"Diametro externo tubo sanitario"*

$$d_{ext} = 0,01902$$

*"Diametro interno tubo sanitario"*

$$d_{int} = 0,0156$$

*"Longitud de los tubos"*

$$Lic = 0,3$$

*"Conductividad térmica del acero inoxidable pasada a kW"*

$$K_{mat} = \text{Conductivity}(\text{Stainless\_AISI304}; T = T4)/1000$$

*"Incrustación interna pasado a kW"*

$$f_{in} = 0,0002 * 1000$$

*"Incrustación externa pasado a kW"*

$$f_{ext} = 0,0001 * 1000$$

*"Coeficiente del liquido que se está vaporizando en el interior de los tubos"*

$$h_{int1} = 2,5$$

*"Coeficiente del liquido que se está condensando en el exterior de los tubos"*

*"Coeficiente externo en Kvatios"*

$$h_{ext1} = 0,943 * ((k_{ic1}^3 * \rho_{ic1}^2 * h_{fg\_ic1} * g) / (\mu_{ic1} * Lic * \Delta T_{ic1}))^{0,25}$$

*"Gravedad"*

$$g = 9,81$$

*"Propiedades de fluido a la temperatura promedio entre el vapor y la pared"*

*"Temperatura promedio entre la superficie de los tubos y el vapor de la caldera"*

$$T_{f\_ic1} = (T1 + T_{s\_ic1})/2$$

*"Conductividad del condensado de la caldera en KW"*

$$k_{ic1} = \text{Conductivity}(\text{Water}; T = T_{f\_ic1}; X = 0)/1000$$

*"Densidad del condensado de la caldera"*

$$\rho_{ic1} = \text{Density}(\text{Water}; T = T_{f\_ic1}; X = 0)$$

*"Calor latente de condensación del fluido de la caldera"*

$$hfg\_ic1 = h1 - h2$$

*"Viscosidad del condensado de la caldera"*

$$\mu\_ic1 = \text{Viscosity}(\text{Water}; T = T1; X = 0)$$

*"Delta entre la superficie y el fluido del primer Intercambiador de Calor"*

$$\Delta T\_ic1 = T_{f\_ic1} - T_{s\_ic1}$$

*"Calculo de la temperatura superficial del primer Intercambiador de Calor"*

$$Q1 = h_{ext1} * (T1 - T_{s\_ic1}) * A1$$

*"Balance del segundo Intercambiador de Calor"*

$$Q2 = m_{w1} * (h4 - h5)$$

$$Q2 = m_{w2} * (h6 - h7)$$

*"Análisis de Transferencia de Calor del Intercambiador de Calor 2"*

$$Q2 = U2 * A2 * \Delta T2$$

$$\Delta T2 = (d3 - d4) / \ln(d3/d4)$$

$$d3 = T4 - T7$$

$$d4 = T5 - T6$$

$$A2 = A1$$

*"Planteamiento de resistencias térmicas para encontrar U del segundo Intercambiador de Calor"*

$$R_{total2} = R_{int2} + R_{cd2} + R_{ens2} + R_{ext2}$$

$$R_{total2} = 1 / (U2 * A2)$$

$$R_{int2} = 1 / (h_{int2} * A_{int2})$$

$$R_{cd2} = \ln(d_{ext}/d_{int}) / (K_{mat} * 2 * \pi * L_{ic} * n_{tubos})$$

$$R_{ext2} = 1 / (h_{ext2} * A2)$$

$$R_{ens2} = f_{in}/A_{int2} + f_{ext}/A2$$

*"Datos para las resistencias del segundo Intercambiador de Calor"*

$$A_{int2} = \pi * d_{int} * L_{ic} * n_{tubos2}$$

$$A2 = \pi * d_{ext} * L_{ic} * n_{tubos2}$$

*"Coeficiente del liquido que se está vaporizando en el interior de los tubos"*

$$h_{int2} = 2,7$$

*"Coeficiente de condensación externo en el segundo intercambiador de calor"*

*"Coeficiente externo en Kvatios"*

$$h_{ext2} = 0,943 * ((k\_ic2^3 * \rho\_ic2^2 * hfg\_ic2 * g) / (\mu\_ic2 * L_{ic} * \Delta T\_ic2))^{0,25}$$

*"Propiedades de fluido a la temperatura promedio entre el vapor a la P1 y la pared"*

*"Temperatura promedio entre la superficie de los tubos y el vapor a la P1"*

$$Tf\_ic2 = (T4 + Ts\_ic2)/2$$

"Conductividad del condensado de la segunda etapa e nKW"

$$k\_ic2 = \text{Conductivity}(\text{Water}; T = Tf\_ic2; X = 0)/1000$$

"Densidad del condensado de la segunda etapa"

$$\rho\_ic2 = \text{Density}(\text{Water}; T = Tf\_ic2; X = 0)$$

"Calor latente de condensación del fluido de la segunda etapa"

$$hfg\_ic2 = h4 - h5$$

"Viscosidad del condensado de la segunda etapa"

$$\mu\_ic2 = \text{Viscosity}(\text{Water}; T = T4; X = 0)$$

"Delta entre la superficie y el fluido del segundo Intercambiador de calor"

$$\Delta T\_ic2 = Tf\_ic2 - Ts\_ic2$$

"Calculo de la temperatura superficial"

$$Q2 = hext2 * (T4 - Ts\_ic2) * A2$$

"Balance en el condensador"

$$Q3 = mw2 * (h6 - h8)$$

$$Q3 = mwt * (h10 - h9)$$

"Análisis de Transferencia de Calor del condensador"

$$Q3 = U3 * A3 * \Delta T3$$

$$\Delta T3 = (d5 - d6)/\ln(d5/d6)$$

$$d5 = T6 - T9$$

$$d6 = T8 - T10$$

"Planteamiento de resistencias térmicas para encontrar U del condensador"

$$Rtotal3 = Rint3 + Rcd3 + Rens3 + Rext3$$

$$Rtotal3 = 1/(U3 * A3)$$

$$Rint3 = 1/(hint3 * Aint3)$$

$$Rcd3 = \ln(dext/dint)/(Kmat * 2 * \pi * Lic * ntubos)$$

$$Rext3 = 1/(hext3 * A3)$$

$$Rens3 = fin/Aint3 + fext/A3$$

"Coeficiente externo de condensación en el condensador"

"Coeficiente externo en Kvatios"

$$hext3 = 0,943 * ((k\_ic3^3 * \rho\_ic3^2 * hfg\_ic3 * g)/(\mu\_ic3 * Lic * \Delta T\_ic3))^0,25$$

"Propiedades de fluido a la temperatura promedio entre el vapor a la P2 y la pared"

"Temperatura promedio entre la superficie de los tubos y el vapor a la P2"

$$Tf\_ic3 = (T6 + Ts\_ic3)/2$$

"Conductividad del condensado en el condensador en KW"

$$k\_ic3 = \text{Conductivity}(\text{Water}; T = Tf\_ic3; X = 0)/1000$$

"Densidad del condensado del condensador"

$\rho_{ic3} = \text{Density}(\text{Water}; T = T_{f\_ic3}; X = 0)$   
"Calor latente de condensación del fluido en el condensador"

$h_{fg\_ic3} = h_6 - h_8$

"Viscosidad del condensado en el condensador"

$\mu_{ic3} = \text{Viscosity}(\text{Water}; T = T_6; X = 0)$

"Delta entre la superficie y el fluido del condensador"

$\Delta T_{ic3} = T_{f\_ic3} - T_{s\_ic3}$

"Calculo de la temperatura superficial"

$Q_3 = h_{ext3} * (T_6 - T_{s\_ic3}) * A_3$

"Propiedades de agua a temperatura promedio"

$T_{w\_ic3} = (T_9 + T_{10})/2$  "Temperatura promedio del agua de enfriamiento"

$\rho_{w\_ic3} = \text{Density}(\text{Water}; T = T_{w\_ic3}; x = 0)$

$\mu_{w\_ic3} = \text{Viscosity}(\text{Water}; T = T_{w\_ic3}; x = 0)$

$Pr_{w\_ic3} = \text{Prandtl}(\text{Water}; T = T_{w\_ic3}; x = 0)$

$k_{f\_ic3} = \text{Conductivity}(\text{Water}; T = T_{w\_ic3}; x = 0)$

"Coeficiente de convección para el agua de enfriamiento"

$Nu_{ic3} = (h_{int3} * d_{int})/k_{f\_ic3}$

"Relación del Nuselt con el Reynolds y el Prandl"

$Nu_{ic3} = 0,023 * Re_{w\_ic3}^{0,8} * Pr_{w\_ic3}^{0,4}$

"Reynolds"

$Re_{w\_ic3} = (Vel_{w\_ic3} * d_{int})/(\mu_{w\_ic3}/\rho_{w\_ic3})$

"Estimacion del area del condensador"

$A_3 = A_1$

$A_{int3} = \pi * d_{int} * L_{ic} * n_{tubos3}$

$A_3 = \pi * d_{ext} * L_{ic} * n_{tubos3}$

$m_{wth} = m_{wt} * 3600$

## Resultados

### Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg

A1 = 0,5211	A2 = 0,5211	A3 = 0,5211	Aint1 = 0,4274	Aint2 = 0,4274
Aint3 = 0,4274	d1 = 74,02	d2 = 22,21	d3 = 51,81	d4 = 27,11
d5 = 24,69	d6 = 22,69	$\delta T1 = 43,04$	$\delta T2 = 38,14$	$\delta T3 = 23,68$
$\Delta T_{ic1} = 1,53$	$\Delta T_{ic2} = 1,483$	$\Delta T_{ic3} = 1,641$	dext = 0,01902	dint = 0,0156
fext = 0,1	fin = 0,2	g = 9,81	h1 = 2671	h10 = 104,8
h2 = 406,5	h3 = 96,42	h4 = 2634	h5 = 313,2	h6 = 2587
h7 = 96,39	h8 = 199,7	h9 = 96,47	hext1 = 13,73	hext2 = 12,96
hext3 = 11,22	hfg <sub>ic1</sub> = 2264	hfg <sub>ic2</sub> = 2321	hfg <sub>ic3</sub> = 2387	hint1 = 2,5
hint2 = 2,7	hint3 = 13,54	kf <sub>ic3</sub> = 0,593	Kmat = 0,01572	k <sub>ic1</sub> = 0,0006635
k <sub>ic2</sub> = 0,0006519	k <sub>ic3</sub> = 0,0006257	Lic = 0,3	mc = 0,009669	mtotal = 0,01667
mtotalh = 60	$\mu_{ic1} = 0,0002909$	$\mu_{ic2} = 0,0003788$	$\mu_{ic3} = 0,0005689$	$\mu_{w,ic3} = 0,0009112$
mw1 = 0,008627	mw2 = 0,00804	mwt = 2,294	mwth = 8259	ntubos = 29,07
ntubos2 = 29,07	ntubos3 = 29,07	v <sub>ic3</sub> = 0,3562	P1 = 38,26	P2 = 11
Pamb = 91	Pr <sub>w,ic3</sub> = 6,428	Pvac1 = 52,74	Pvac2 = 80	Q1 = 21,89
Q2 = 20,02	Q3 = 19,19	Rcd1 = 0,2302	Rcd2 = 0,2302	Rcd3 = 0,2302
rel1 = 0,8923	rel2 = 0,8315	Rens1 = 0,6598	Rens2 = 0,6598	Rens3 = 0,6598
Rext1 = 0,1398	Rext2 = 0,1481	Rext3 = 0,171	Re <sub>w,ic3</sub> = 12,12	$\rho_{ic1} = 961,6$
$\rho_{ic2} = 975,8$	$\rho_{ic3} = 989,7$	$\rho_{w,ic3} = 997,3$	Rint1 = 0,9358	Rint2 = 0,8665
Rint3 = 0,1728	Rtotal1 = 1,966	Rtotal2 = 1,905	Rtotal3 = 1,234	T1 = 97,02
T10 = 25	T2 = 97,02	T3 = 23	T4 = 74,81	T5 = 74,81
T6 = 47,69	T7 = 23	T8 = 47,69	T9 = 23	Tamb = 23
Tf <sub>ic1</sub> = 95,49	Tf <sub>ic2</sub> = 73,33	Tf <sub>ic3</sub> = 46,05	Ts <sub>ic1</sub> = 93,96	Ts <sub>ic2</sub> = 71,84
Ts <sub>ic3</sub> = 44,41	$\overline{T}_{w,ic3} = 24$	U1 = 0,9763	U2 = 1,008	U3 = 1,555
Vel <sub>w,ic3</sub> = 0,0007098				

## "Diseño Mecánico"

### "Datos Iniciales"

$d_{i_e} = 0,0156$   
 $d_{o_e} = 0,01902$   
 $L_e = 0,3$   
 $P_{sat} = 11$   
 $mv = 0,008627$   
 $N_{t_e} = 30$

### "Evaporador de Agua"

$D_{i_e} = D_{o_e} - 2 * L_{tw_e}$   
 $L_{tp_e}/D_{o_e} = 1,5$   
 $\theta_{tp_e} = 45$   
 $L_{to_e} = L_e + 2 * L_{ts_e}$   
 $L_{ts_e} = 0,5 * D_{s_e} * \sqrt{P_{sat}/\sigma_{ts}}$   
**"Resistencia ultima a la traccion del acero inoxidable"**  
 $\sigma_{ts} = 520e6$   
 $Dotl_e = D_{s_e} - L_{bb_e}$   
 $Dctl_e = Dotl_e - D_{o_e}$   
 $N_{t_e} = (0,78 * Dctl_e^2)/(Cr * L_{tp_e}^2)$   
 $Cr = 0,707$   
 $D_{s_e}/D_{o_e} = 11$   
 $\rho_s = \text{Density}(\text{Water}; P = 9590; T = 45)$   
 $V_{ns\_max\_e} = \sqrt{750/\rho_s}$   
 $D_{ns\_min\_e} = \sqrt{mv/((\pi/4) * \rho_s * V_{ns\_max\_e})}$   
 $L_{ns\_e} = 0,25 * D_{ns\_min\_e}$

### "Datos Iniciales"

$d_{i_c} = 0,0156$   
 $d_{o_c} = 0,01902$   
 $L_c = 0,3$   
 $mv_c = 0,00804$   
 $N_{t_c} = 30$

### "Condensador de Agua"

$D_{i_c} = D_{o_c} - 2 * L_{tw_c}$   
 $L_{tp_c}/D_{o_c} = 1,5$   
 $\theta_{tp_c} = 45$   
 $L_{to_c} = L_c + 2 * L_{ts_c}$   
 $L_{ts_c} = 0,5 * D_{s_c} * \sqrt{P_{sat}/\sigma_{ts}}$   
 $Dotl_c = D_{s_c} - L_{bb_c}$   
 $Dctl_c = Dotl_c - D_{o_c}$   
 $N_{t_c} = (0,78 * Dctl_c^2)/(Cr * L_{tp_c}^2)$

$$D_{s,c}/D_{o,c} = 11$$

$$V_{ns\_max\_c} = \sqrt{750/\rho_{o,s}}$$

$$D_{ns\_min\_c} = \sqrt{mv_c/((\pi/4) * \rho_{o,s} * V_{ns\_max\_c})}$$

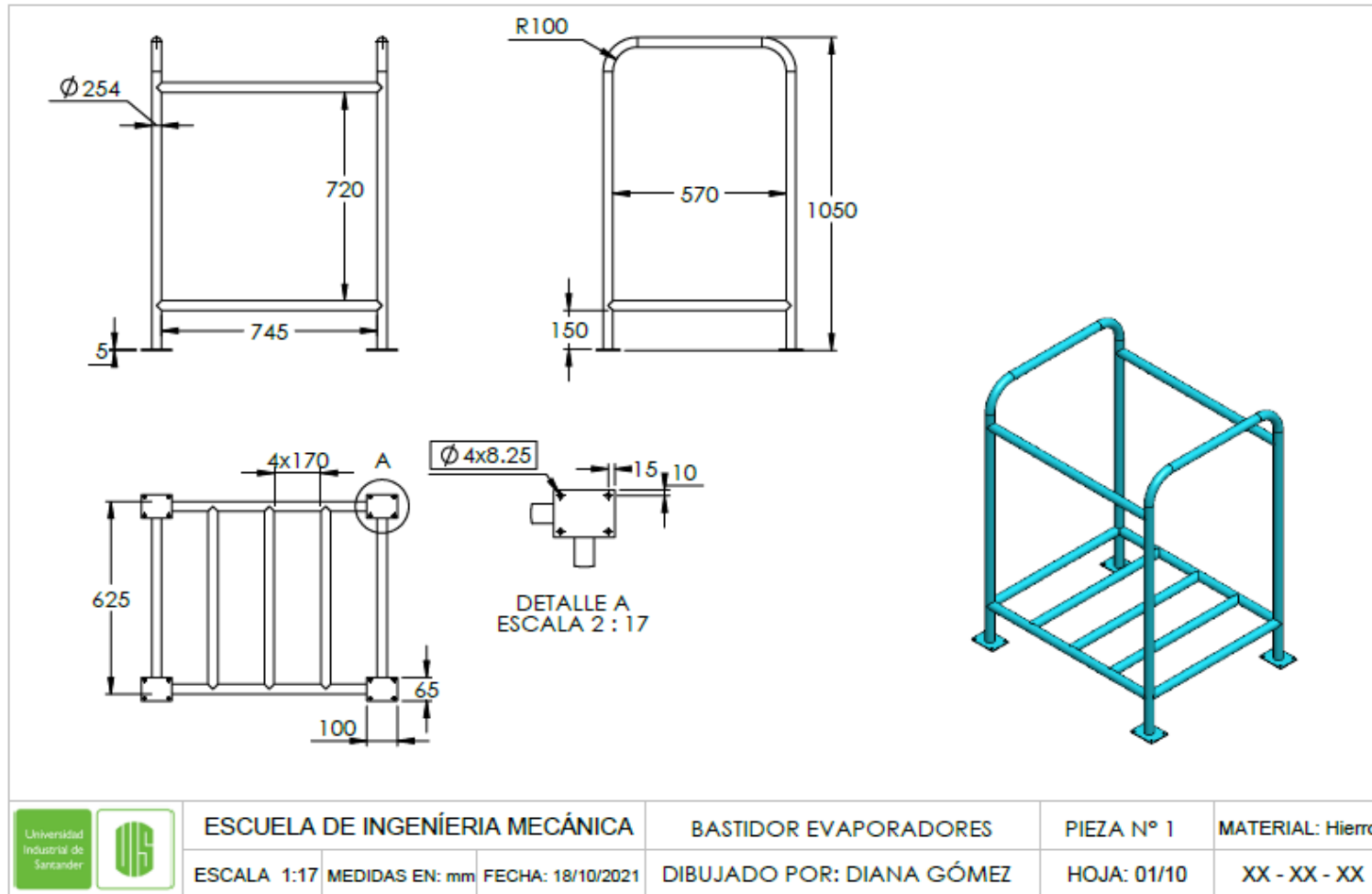
$$L_{ns\_c} = 0,25 * D_{ns\_min\_c}$$

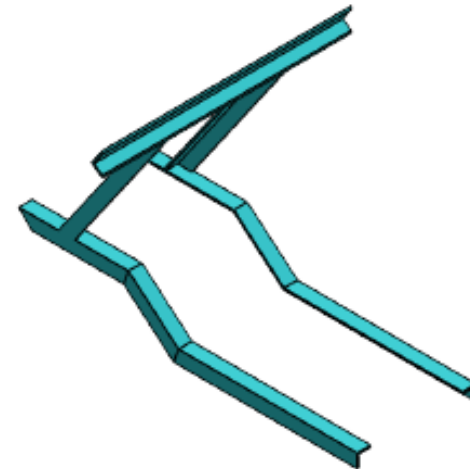
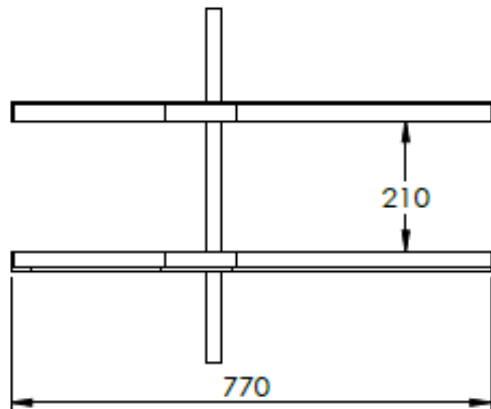
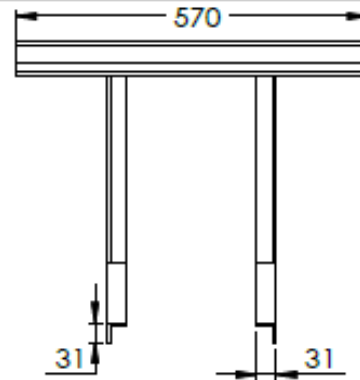
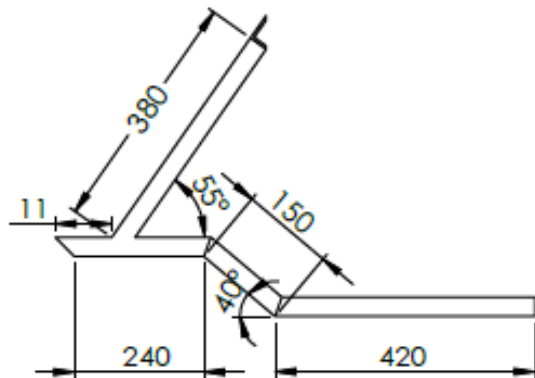
## Resultados

### Unit Settings: SI C Pa J mass deg

Cr = 0,707	Dctl <sub>C</sub> = 0,1488	Dctl <sub>e</sub> = 0,1488	Dns <sub>min,C</sub> = 0,003447
Dns <sub>min,e</sub> = 0,00357	Dotl <sub>C</sub> = 0,1678	Dotl <sub>e</sub> = 0,1678	<b>Ds<sub>C</sub> = 0,2092</b>
<b>Ds<sub>e</sub> = 0,2092</b>	d <sub>i,C</sub> = 0,0156	d <sub>i,e</sub> = 0,0156	d <sub>o,C</sub> = 0,01902
d <sub>o,e</sub> = 0,01902	Lbb <sub>C</sub> = 0,04143	Lbb <sub>e</sub> = 0,04143	Lns <sub>C</sub> = 0,0008616
Lns <sub>e</sub> = 0,0008926	<b>Lto<sub>C</sub> = 0,3</b>	<b>Lto<sub>e</sub> = 0,3</b>	Ltp <sub>C</sub> = 0,02853
Ltp <sub>e</sub> = 0,02853	Lts <sub>C</sub> = 0,00001521	Lts <sub>e</sub> = 0,00001521	Ltw <sub>C</sub> = 0,00171
Ltw <sub>e</sub> = 0,00171	L <sub>C</sub> = 0,3	L <sub>e</sub> = 0,3	mv = 0,008627
mv <sub>C</sub> = 0,00804	N <sub>t,C</sub> = 30	N <sub>t,e</sub> = 30	P <sub>sat</sub> = 11
ρ <sub>s</sub> = 990,2	σ <sub>ts</sub> = 5,200E+08	θ <sub>tp,C</sub> = 45	θ <sub>tp,e</sub> = 45
Vns <sub>max,C</sub> = 0,8703	Vns <sub>max,e</sub> = 0,8703		

### Anexo C. Planos





ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA

Soporte 1

PIEZA N° 3

MATERIAL: Hierro

ESCALA 1:5

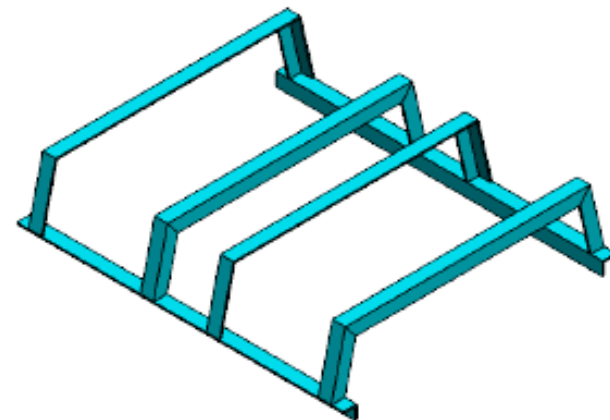
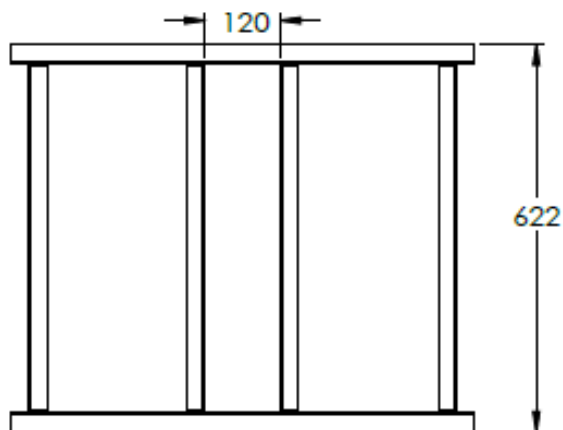
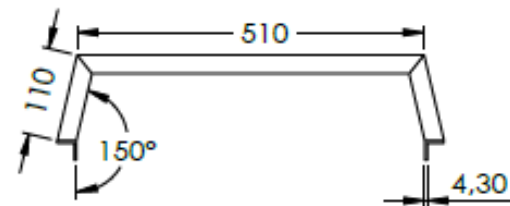
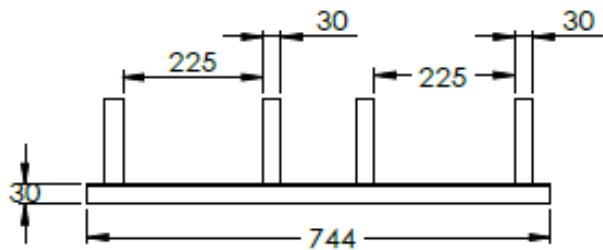
MEDIDAS EN: mm

FECHA: 15/02/2020

DIBUJADO POR: DIANA GÓMEZ

HOJA: 02/10

XX - XX - XX



Universidad  
Industrial de  
Sarcander



ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Soporte 3 y 2

PIEZA N° 2

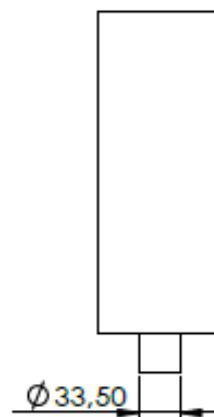
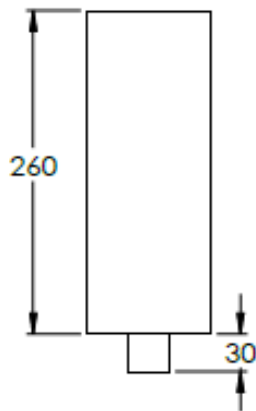
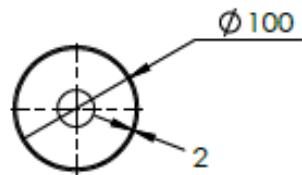
MATERIAL: Hierro

ESCALA 1:17 MEDIDAS EN: mm FECHA: 15/02/2020

DIBUJADO POR: DIANA GÓMEZ

HOJA: 03/10

XX - XX - XX



ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA

ESCALA 1:5 MEDIDAS EN: mm FECHA: 15/02/2020

Tanque alimentación

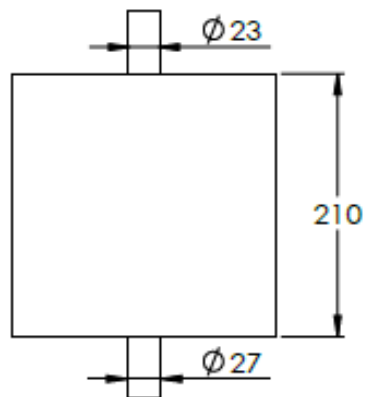
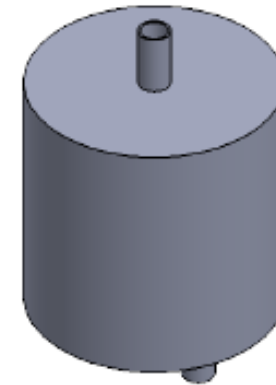
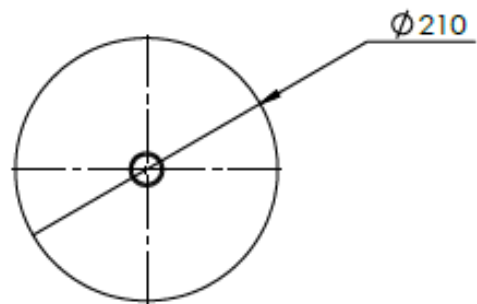
DIBUJADO POR: DIANA GÓMEZ

PIEZA N° 7

HOJA: 03/10

MATERIAL: Acero inoxidable 304

XX - XX - XX



ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Tanque de condensado

PIEZA N° 8

MATERIAL: Acero inoxidable 304

ESCALA 1:5

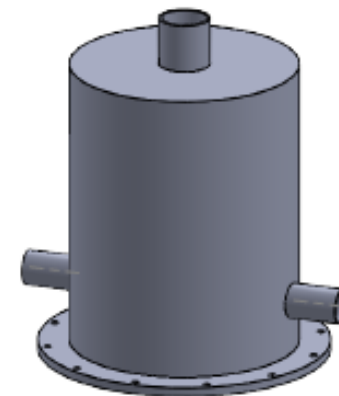
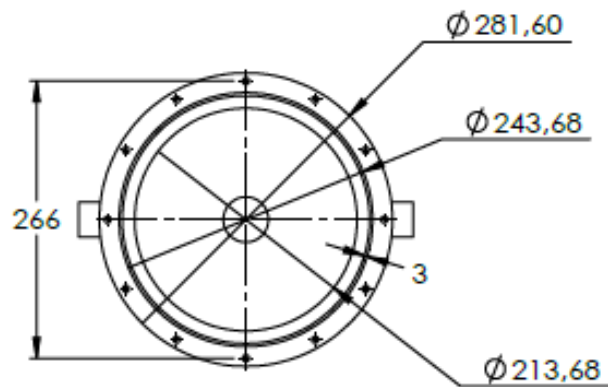
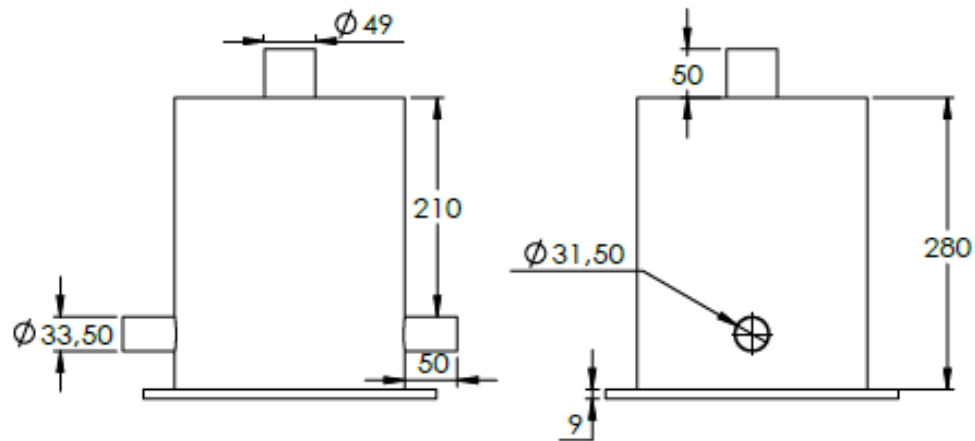
MEDIDAS EN: mm

FECHA: 15/02/2020

DIBUJADO POR: DIANA GÓMEZ

HOJA: 04/10

XX - XX - XX



ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

TAPA SUPERIOR

PIEZA N° 6

MATERIAL: Acero inoxidable 304

ESCALA 1:6

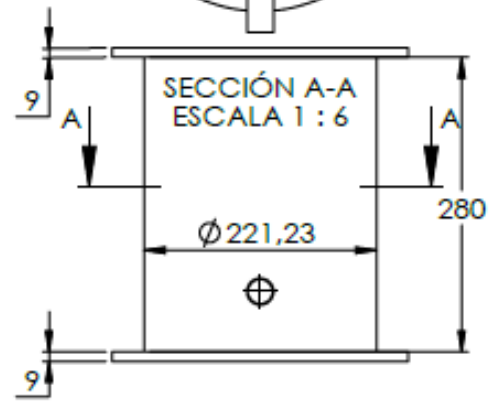
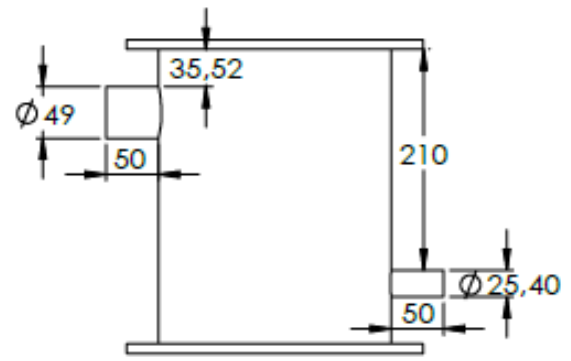
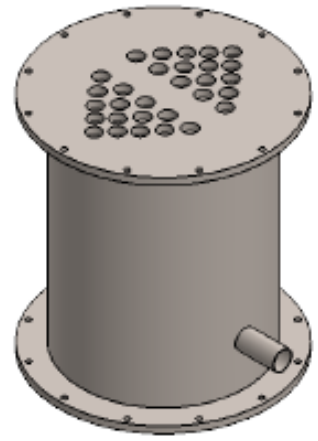
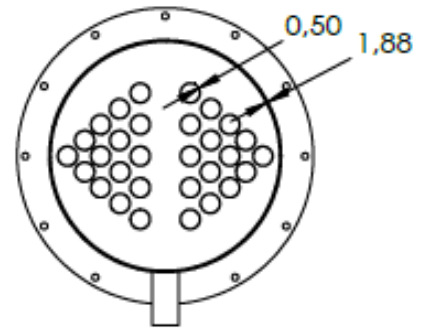
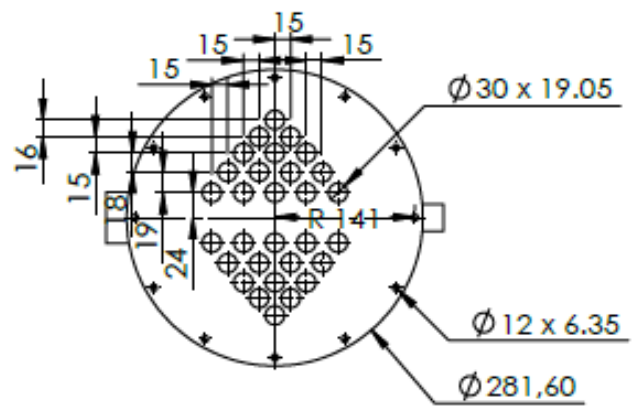
MEDIDAS EN: mm


FECHA: 15/02/2020

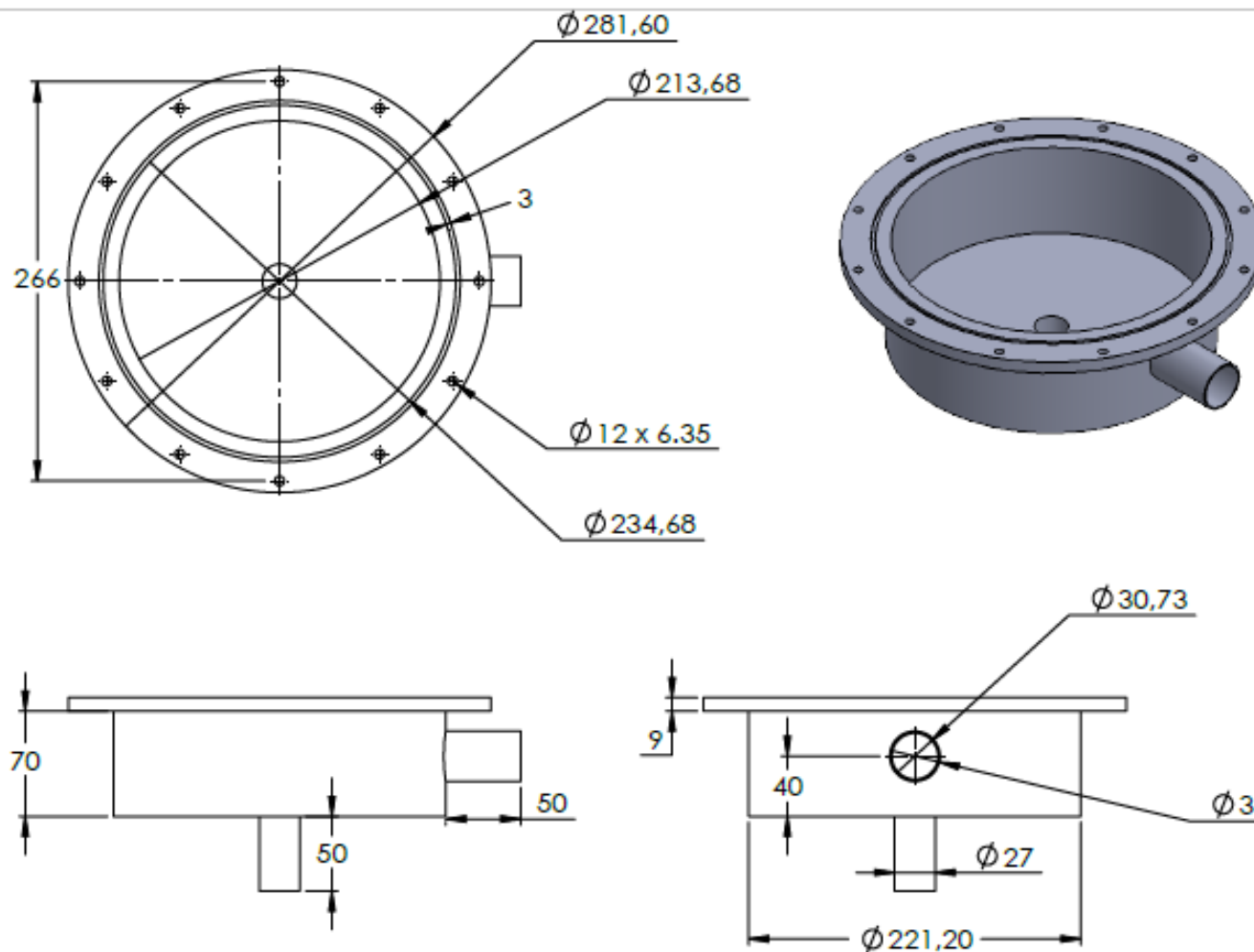
DIBUJADO POR: DIANA GÓMEZ

HOJA: 07/10

XX - XX - XX



	<b>ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b>			<b>Coraza y Tubos</b>	<b>PIEZA N° 4</b>	<b>MATERIAL: Acero inoxidable 304</b>
	<b>ESCALA 1: 6</b>	<b>MEDIDAS EN: mm</b>	<b>FECHA: 15/02/2020</b>	<b>DIBUJADO POR: DIANA GÓMEZ</b>	<b>HOJA: 06/10</b>	<b>XX - XX - XX</b>



ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

TAPA INFERIOR

PIEZA N° 5

MATERIAL: Acero inoxidable 304

ESCALA 1:4

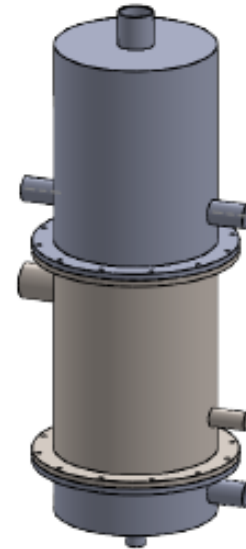
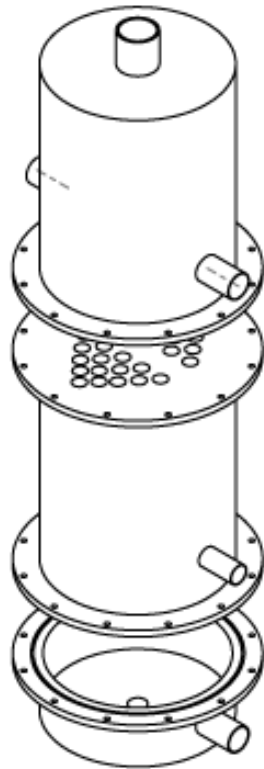
MEDIDAS EN: mm


FECHA: 15/02/2020

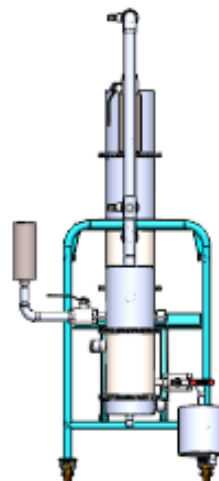
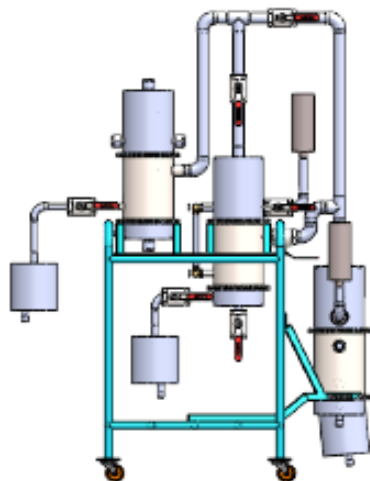
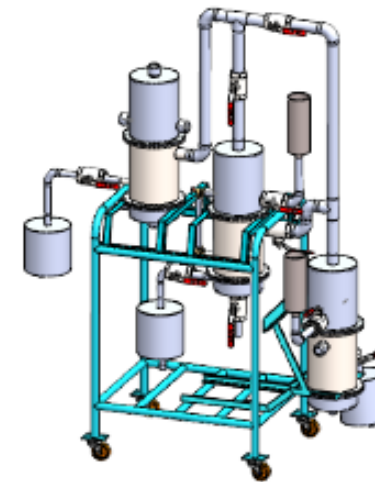
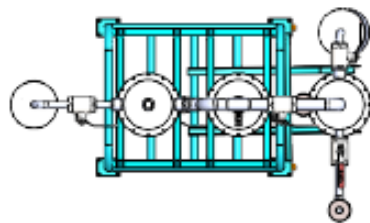
DIBUJADO POR: DIANA GÓMEZ

HOJA: 08/10

XX - XX - XX



5	Pernos 5/16	24	
4	O' ring	2	
3	Coraza y tubos	1	
2	Tapa inferior	1	
1	Tapa superior	1	
#	NOMBRE	CANT	DESCRIPCION
		<b>ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA</b>	
ESCALA 1:5			
DIBUJADO POR: DIANA GÓMEZ		15 / 02 / 2020	PIEZA N° 1
FORMATO: A3 REVISADO POR: Omar Gelvez		15 / 02 / 2020	HOJA: XX
MEDIDAS EN: mm		MATERIAL: Acero inoxidable 304	XX - XX - XX



6	VISORES DE NIVEL	2	
5	VALVULAS		1" 1/2 (7), 3/4" (2), 1" (4),
4	CONEXIÓN		Codos 7, TE 2, nipples 10, universales 3
3	BASTIDOR		Ruedas 4, apoyos 2 y bastidor
2	TANQUES	5	Alimentación 2 condensado 3
1	INTERCAMBIADORES	3	Evaporadores 2 condensadores 1
#	NOMBRE	CANT	DESCRIPCION



ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

ESCALA X:X

	DIBUJADO POR: DIANA GÓMEZ	15 / 02 / 2020	ENSAMBLE
FORMATO: A3	REVISADO POR: OMAR GELVEZ	15 / 02 / 2020	HOJA: 08/10
MEDIDAS EN: mm	MATERIAL: Acero inoxidable 304		XX - XX - XX

