

**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.**

JULIAN FERNANDO GARCIA JAUREGUI

WILMER ALFONSO SILVA RAMIREZ

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

2020

**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.**

JULIAN FERNANDO GARCIA JAUREGUI

WILMER ALFONSO SILVA RAMIREZ

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

DIRECTOR

OMAR ARMANDO GELVEZ AROCHA

INGENIERO MECANICO

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

2020

DEDICATORIA

El autor Julián Fernando García Jauregui dedica este logro a:

Dios primero que todo por permitirme la vida, el tiempo, la paciencia y el conocimiento necesario para estar donde estoy hoy.

Mis padres Fernando y Lorena y a mi hermano Alejandro por estar siempre a mi lado y apoyarme siempre en mi camino de vida.

Mis amigos y colegas Kathe, Andrea, Joseph, Luisca, Martin, Willy, Pardo, Nikol, Gualdrón y todos los demás que se me escapan en este momento por estar siempre en las buenas y en las malas y por sus grandes o pequeñas contribuciones a este proyecto.

Mi compañero de proyecto Wilmer por lograr la meta de la ejecución satisfactoria de este proyecto y por sobrellevar todos los imprevistos que surgieron en la ejecución de este.

Al gran Ingeniero y profesor Omar Gelvez por permitirnos desarrollar este proyecto de la mano de él y por todas las vivencias y experiencias adquiridas como estudiantes y como auxiliares del laboratorio de sistemas térmicos.

DEDICATORIA

El autor Wilmer Alfonso Silva Ramírez dedica este logro a:

Mi madre Beatriz y mis hermanas Dolly, Martha y Leidy que con arduo trabajo y sacrificio me ayudaron incondicionalmente y permitieron que pudiera tener este proceso de formación exitoso.

Mis compañeros de carrera que me brindaron apoyo en las diferentes actividades que desarrollamos juntos e individualmente, superando todos los obstáculos que se presentaron, además, quisiera resaltar a mi compañero de proyecto de grado Julián García con el cual tuve una excelente relación académica y profesional que permitió el correcto desarrollo del proyecto de grado.

Todas las personas que me han apoyado y han hecho que el proyecto se realice con éxito en especial a aquellos que nos abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.

Al MEng Omar Armando Gelvez arrocha por ser un excelente profesor, jefe y director de proyecto de grado, con su experiencia, conocimiento y motivación nos orientó en el desarrollo del proyecto gracias a sus consejos y correcciones.

AGRADECIMIENTOS

Van a faltar páginas para agradecer a las personas que se han involucrado en la realización de este trabajo, sin embargo, merecen reconocimiento especial el profesor Omar Gelvez director de este proyecto, Avidesa Mac Pollo S.A. por darnos la oportunidad para realizar este proyecto, a la doctora Elsa Gelvez directora aseguramiento, calidad e inocuidad de Avidesa Mac Pollo S.A. y a todo el personal de Avidesa Mac pollo S.A. por ayudarnos a desarrollar y ejecutar este proyecto.

A los profesores de la escuela de ingeniería mecánica que hicieron posible este logro, gracias a todos los conocimientos que nos brindaron.

A la escuela de ingeniería mecánica y a la Universidad Industrial de Santander por darnos la oportunidad de estudiar y crecer profesional y moralmente.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	20
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	22
2. OBJETIVOS.....	32
2.1 OBJETIVO GENERAL	32
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	32
3. MARCO TEORICO	34
3.1 AGUA RESIDUAL.....	34
3.1.1 Definición	34
3.1.2 Clasificación.....	34
3.1.3 Parámetros de caracterización del agua residual	34
3.1.4 Procesos para el tratamiento de agua residuales.....	35
3.2 DESTILACIÓN DE AGUA RESIDUAL	38
3.2.1 Definición	38
3.2.2 Clasificación de los sistemas de depuración de agua residual	38
3.2.2.1 Destilación por compresión mecánica de vapor (CMV)	38
3.2.2.2 Destilación por bomba de calor.....	39
3.2.2.3 Destilación por vapor residual.....	41
4. METODOLOGÍA DE DISEÑO.....	47
4.1 SELECCIÓN DEL SISTEMA DE DESTILACIÓN POR CALOR RESIDUAL....	47
4.1.1 Tipo de evaporador	47
4.1.2 Tipo de subsistema usado para condensar el vapor.....	48
4.1.3 Cantidad de efectos	48
4.2 REQUERIMIENTOS Y CONDICIONES DEL SISTEMA	50
4.3 MODELAMIENTO TERMODINÁMICO.....	52
4.4 MODELAMIENTO DE TRANSFERENCIA DE CALOR.....	54
4.5 DISEÑO MECÁNICO	62
4.5.1 Cálculo del espesor mínimo necesario en los tubos y la coraza.....	62
4.5.2 Calculo de las bridas de unión.....	65
4.5.3 Diseño de soportes	66

5. CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DEL SISTEMA	69
5.1 EVAPORADORES – CONDENSADORES Y CONDENSADOR ENFRIADO POR AGUA.....	69
5.1.2 Materiales de construcción.	70
5.1.3 Corte y ensamblaje de equipos.....	71
5.1.4 Proceso de soldadura de equipos y bridas de unión.	72
5.1.5 Pruebas de hermeticidad para Cascos de los equipos.	73
5.1.6 Instalación de soportes y ubicación en sitio.	73
5.2 TANQUES DE CONDENSADOS.....	75
5.3 CONEXIÓN ENTRE EQUIPOS.....	76
5.3.1 Modelo CAD del sistema total ensamblado.....	76
5.3.2 Conexión vapor residual.	77
5.3.3 Conexión primer y segundo evaporador.	78
5.3.4 Conexión segundo evaporador y condensador.....	79
5.3.5 Conexión Agua a destilar.	79
5.3.6 Conexión agua fría torre a condensador.....	80
5.3.7 Conexión agua caliente torre a condensador.....	81
5.3.8 Purgas evaporadores.....	81
5.3.9 Instrumentación.	82
6. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	84
6.1 PRUEBA CON AGUA LIMPIA	84
6.1.1 Condiciones de prueba con agua limpia.	84
6.1.2 Procedimiento de prueba con agua limpia.....	85
6.1.3 Resultados prueba con agua limpia.....	85
6.2 PRUEBA CON EFLUENTE DE LA PTAR.....	91
6.2.1 Condiciones de prueba con efluente de la PTAR.	91
6.2.2 Procedimiento de prueba con efluente de la PTAR.	91
6.3 RESULTADOS DE MUESTRAS.....	99
6.4 COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR	101
7. COSTOS.....	103
7.1 CONSUMO ELÉCTRICO DE ENERGÍA DEL PROTOTIPO.....	103

7.2 COSTO DE CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO	105
7.3 VIABILIDAD Y DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA A ESCALA.	106
8 CONCLUSIONES	108
9 RECOMENDACIONES	111
BIBLIOGRAFÍA.....	112

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Planta de Harinas de Avidesa Mac Pollo S.A.	24
Figura 2. Caldera principal de la planta de harinas de Avidesa Mac Pollo S.A.	25
Figura 3. Cooker de vísceras número 4 de la planta de harinas de Avidesa Mac pollo S.A.	25
Figura 4. Esquemático del cooker.	26
Figura 5. Esquema de los procesos presentes en la planta de harinas de Avidesa Mac Pollo S.A (para un solo cooker).....	26
Figura 6. Distribución de los diferentes flujos de agua en la planta de harinas de Avidesa Mac Pollo S.A.....	28
Figura 7. PTAR de la planta de harinas de Avidesa Mac Pollo S.A.	28
Figura 8. Condensador de vapor de desecho utilizado actualmente.....	31
Figura 9. Torre de enfriamiento acoplada al condensador.	31
Figura 10. Esquema de un sistema de compresión mecánica de vapor.	39
Figura 11. Esquema de un sistema de destilación por bomba de vacío.	40
Figura 12. Destilador de agua residual con evaporador horizontal.	42
Figura 13. Destilador de agua residual con evaporador vertical.	42
Figura 14. Destilador de agua residual con condensador enfriado por aire.	43
Figura 15. Destilador de agua residual con condensador enfriado por agua.	44
Figura 16. Sistema de destilación de agua residual de simple efecto.....	45
Figura 17. Sistema de destilación de agua residual de doble efecto.	46
Figura 18. Sistema de destilación de agua residual de triple efecto.	46
Figura 19. Mejor opción del sistema de destilación por vapor residual.....	49
Figura 20. Esquema cero dimensional del sistema de destilación de agua residual.	51
Figura 21. Esquema de los volúmenes de control.	52
Figura 22. Esquema de los flujos de cada intercambiador.....	54
Figura 23. Esquema de la distribución de temperaturas del primer efecto.	60

Figura 24. Esquema de la distribución de temperaturas del segundo efecto.....	60
Figura 25. Esquema de la distribución de temperaturas del condensador.....	61
Figura 26. Distribución de tubos.....	61
Figura 27. Procedimiento de cálculo para espesores de recipientes sometidos a presión externa según la norma ASME sección VIII UG-28.	64
Figura 28. Modelo CAD, evaporadores condensadores y condensador enfriado por agua.....	70
Figura 29. Materiales usados para construcción de Evaporadores y Condensador.	71
Figura 30. Corte y ensamblaje de Evaporadores y Condensador.....	71
Figura 31. Proceso de soldadura de equipos y bridas de unión.	72
Figura 32. Pruebas de hermeticidad para cascos de los equipos.	73
Figura 33. Instalación de soportes.	74
Figura 34. Ubicación de equipos en sitio.	74
Figura 35. Modelo CAD tanques de condensado.....	75
Figura 36. Ubicación de tanques de condensado en sitio.....	76
Figura 37. Modelo CAD del sistema total ensamblado.	76
Figura 38. Conexión del vapor residual.....	77
Figura 39. Conexión primer y segundo Evaporador.....	78
Figura 40. Conexión segundo evaporador y condensador.....	79
Figura 41. Conexión del agua a destilar.....	80
Figura 42. Conexión entre torre y condensador (agua fría).	80
Figura 43. Conexión entre torre y condensador (agua caliente).	81
Figura 44. Purga de los evaporadores.	82
Figura 45. Instrumentalización de los evaporadores.....	83
Figura 46. Evolución de Temperatura vs tiempo para ambos efectos con agua limpia.	86
Figura 47. Evolución de la presión de vacío vs tiempo para ambos efectos con agua limpia.	87
Figura 48. Reposición de agua vs tiempo para ambos efectos con agua limpia...88	88

Figura 49. Destilado total vs tiempo con agua limpia.....	89
Figura 50. Diagrama p-h para el agua.	89
Figura 51. Destilado incremental vs tiempo con agua limpia	90
Figura 52. Controlador de nivel.	92
Figura 53. Evolución de Temperatura vs tiempo del primer efecto sujeto a reposiciones de nivel con el efluente de la PTAR.....	93
Figura 54. Evolución de Temperatura vs tiempo del segundo efecto sujeto a reposiciones de nivel con el efluente de la PTAR	94
Figura 55. Evolución de presión absoluta y temperatura vs tiempo para el segundo efecto con el efluente de la PTAR.....	95
Figura 56. Evolución de presión absoluta y temperatura vs tiempo para el segundo efecto con el efluente de la PTAR.....	95
Figura. 57. Reposición de nivel vs tiempo para ambos efectos con el efluente de la PTAR.	96
Figura. 58. Destilado total vs tiempo para ambos efectos con el efluente de la PTAR.	97
Figura. 59. Destilado incremental total vs tiempo para ambos efectos con el efluente de la PTAR.	98
Figura 60. Caudal cooker vs tiempo para ambos efectos con el efluente de la PTAR.	98
Figura 61. Efluente de la PTAR, el destilado producido por el sistema y los lodos concentrados.	101
Figura 62. Parámetros de operación teóricos de la bomba de vacío utilizada. ...	103
Figura 63. Diagrama circular de los costos del proyecto.....	105
Figura 64. Diagramas de barras de los costos del proyecto.	106

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Subsistemas de la planta de harinas.....	23
Tabla 2. Corrientes de agua residual en la planta de harinas.	27
Tabla 3. Valores máximos permitidos para vertimientos puntuales de agua residual según el MADS.	29
Tabla 4. Parámetros contaminantes críticos presentes en las aguas residuales de la planta de harinas de Avidesa Mac Pollo S.A.	29
Tabla 5. Flujos volumétricos de aguas residuales presentes en la planta de harinas de Avidesa Mac Pollo S.A.....	30
Tabla 6. Procesos físicos para el tratamiento de agua residual.	35
Tabla 7. Procesos químicos para el tratamiento de agua residual.	36
Tabla 8. Procesos biológicos para el tratamiento de agua residual.....	37
Tabla 9. Matriz QFD para selección del tipo de evaporador.....	47
Tabla 10. Matriz QFD para el subsistema de condensación.	48
Tabla 11. Matriz QFD para cantidad de efectos.	49
Tabla 12. Datos iniciales	51
Tabla 13. Balances de masa y energías.	52
Tabla 14. Resultados de los balances de masa y energía.	53
Tabla 15. Cálculo del número de tubos requeridos para los intercambiadores	55
Tabla 16. Presiones de vacío soportadas para los espesores seleccionados.....	63
Tabla 17. Resultados obtenidos del diseño de las bridas con base a la norma ASME.	65
Tabla 18. Cálculo de los soportes.	66
Tabla 19. Equipos necesarios para el funcionamiento del sistema.	69
Tabla 20. Materiales usados para construcción de Evaporadores y Condensador.	70
Tabla 21. Materiales usados para bridas de unión.	72
Tabla 22. Materiales usados para tornillería de equipos.	73
Tabla 23. Materiales usados para tanques de condensado.	75

Tabla 24. Materiales usados para la conexión del vapor residual.	77
Tabla 25. Materiales usados para la conexión entre evaporadores.	78
Tabla 26. Materiales usados para la conexión entre el segundo evaporador y el condensador.	79
Tabla 27. Materiales usados para la conexión del agua a destilar.	79
Tabla 28. Materiales usados para la conexión de agua fría entre torre y condensador.	80
Tabla 29. Materiales usados para la conexión de agua caliente entre torre y condensador.	81
Tabla 30. Materiales usados para la purga de los evaporadores.	81
Tabla 31. Materiales usados para la instrumentalización de los evaporadores.....	82
Tabla 32. Parámetros analizados en las pruebas de funcionamiento.	84
Tabla 33. Resultados globales para prueba con agua limpia.	91
Tabla 34. Resultados globales para prueba con el efluente de la PTAR.....	99
Tabla 35. Resultados pruebas de laboratorio para DQO, SST y CLORUROS del destilado producido.....	100
Tabla 36. Datos tomados con el sistema en funcionamiento.	101
Tabla 37. Coeficiente global de transferencia de calor real versus calculo.	101
Tabla 38. Voltaje, corriente y potencia consumidas por la bomba.....	104
Tabla 39. Costo de la energía eléctrica según el tiempo de uso.	104
Tabla 40. Costos totales del desarrollo del proyecto.	105
Tabla 41. Datos reales del prototipo.....	106
Tabla 42. Datos del sistema a escala.....	107
Tabla 43. Resultados con el sistema del total del vapor residual.	107

LISTA DE ANEXOS

“Los anexos están adjuntos en el CD Y puede visualizarlos en base de datos de biblioteca UIS”

Anexo A. Manual de operación y mantenimiento

Anexo B. Hoja de cálculo de brida

Anexo C. Planos de los modelos CAD.

Anexo D. Cálculos de transferencia de calor, termodinámica y diseño mecánico.

RESUMEN

TITULO: 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. *

AUTORES: Julián Fernando García Jauregui; Wilmer Alfonso Silva Ramírez. **

PALABRAS CLAVES: Agua residual; transferencia de calor; intercambiador de calor; vacío; evaporación por efectos.

DESCRIPCIÓN:

Los procesos producción de harina en la industria avícola tienen un gran beneficio económico, debido a la utilización de los subproductos procedentes del beneficio del pollo los cuales son usados posteriormente para la producción de concentrado para pollos, sin embargo, estos procesos conllevan la producción de grandes cantidades de aguas residuales que presentan alta carga contaminante y posibles consecuencias físicas, ambientales y de salud para las personas y ecosistemas aledaños evitando que puedan ser desechadas directamente en la fuente hídrica más cercana. Se ha desarrollado un sistema de destilación con intercambiadores verticales de doble efecto en paralelo que opera en vacío gracias a la disposición de su fuente energética principal que se encuentra a la presión atmosférica del sitio de ubicación, el cual permite aumentar el flujo de agua a tratar gracias al reaprovechamiento de la energía transferida en el primer efecto. Este proceso de depuración de agua permite disminuir las concentraciones de agentes contaminantes presentes en el agua que llegan a la PTAR (Planta de Tratamiento de Agua Residual) y con esto se garantiza que puedan ser desechadas sin tener ningún tipo de efecto negativo sobre el medio ambiente, gracias a este sistema Avidesa Mac Pollo S.A. ha logrado cumplir con los estándares establecidos por la normativa colombiana.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Director MEng. Omar Armando Gelvez Arocha.

ABSTRACT

TITLE: DESIGN OF A THERMAL SYSTEM PROTOTYPE TO SEWAGE TREATMENT IN THE FLOURS PLANT OF AVIDESA MAC POLLO S.A., BY USING WASTE STEAM OF COOKING STAGE FROM CHICKEN BENEFIT PRODUCTS. *

AUTHORS: Julian Fernando García Jauregui; Wilmer Alfonso Silva Ramírez. **

KEYWORDS: sewage; heat transfer; exchanger; vacuum; boiling by effects.

DESCRIPTION:

The flour production processes in the poultry industry have a great economic benefit, due to the use of by-products from the chicken processing which are subsequently used for the production of concentrate for chickens, however, these processes lead to the production of large quantities of wastewater that have a high pollutant load and possible physical, environmental and health consequences for the surrounding people and ecosystems, preventing them from being disposed of directly in the closest water source. A distillation system has been developed with vertical double-effect exchangers in parallel that operates in a vacuum thanks to the arrangement of its main energy source that is at the atmospheric pressure of the location site, which allows increasing the flow of water to be treated thanks to the reuse of the energy transferred in the first effect. This water purification process allows reducing the concentrations of pollutants present in the water that reach the WWTP (Wastewater Treatment Plant) and with this it is guaranteed that they can be disposed of without having any type of negative effect on the environment. , thanks to this system Avidesa Mac Pollo SA It has managed to comply with the standards established by Colombian regulations.

* Bachelor thesis.

** Facultad de Ingenierías físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Director MEng. Omar Armando Gelvez Arocha.

INTRODUCCIÓN

La importancia del agua es fundamental para la vida de todos los seres vivos en el planeta, la superficie terrestre está cubierta por más de un 70% de este preciado líquido, sin embargo, 97% no es consumible debido a que es agua salada, el 2% está en fase sólida en los polos y el 1% es apta para el consumo de los seres humanos, es por esta razón que en la actualidad existen muchas campañas de sensibilización para la protección, cuidado y consumo moderado.

Las aguas residuales hacen referencia a toda fuente hídrica que ha sido afectada de manera negativa por acción del hombre, sin importar el ámbito donde hayan sido usadas (doméstico, industrial, de crianza de animales o que por malas prácticas hayan sido mezcladas con las mencionadas anteriormente). En Colombia la entidad gubernamental encargada de velar por el bienestar del medio ambiente es el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), el cual ha definido normas que limitan los niveles críticos de contaminantes biológicos, físicos y químicos para el vertimiento en efluentes, estos límites varían dependiendo del lugar donde se viertan (alcantarillado o cuerpos de agua) y el entorno donde fue utilizada (ganadería, industria, hogares, etc).

Avidesa Mac Pollo S.A. es una empresa dedicada a la producción y comercialización de diversos productos provenientes de la industria avícola, a lo largo de su historia ha logrado incorporarse competitivamente en el mercado nacional e internacional dando cumplimiento a su misión, la cual garantiza satisfacer las necesidades nutricionales de sus clientes con la mejor calidad, servicio, variedad y precio. Estos procesos de producción y comercialización tienen como resultado la generación de agua residual que posee diferentes tipos de contaminantes impidiendo que pueda ser desechada directamente sobre las fuentes hídricas más cercanas. La finalidad de este proyecto es disminuir la concentración de toda impureza orgánica e inorgánica de agua residual proveniente de la planta de harinas de Avidesa Mac Pollo S.A., que pueda atentar en contra del medio ambiente o la

salud pública, para lograr este fin, se decidió realizar un proceso de evaporación y posteriormente condensación del agua con el fin de reducir los contaminantes principales como DQO (Demanda Química de Oxígeno), DBO (Demanda Biológica de Oxígeno), sólidos suspendidos, cloruros y sulfatos.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las aguas residuales contienen sustancias contaminantes de naturaleza orgánica e inorgánica que son generadas durante el proceso industrial. El componente orgánico se refiere a la introducción de materias de procedencia orgánica, normalmente biodegradables cuya presencia en el agua residual conduce a la aparición y crecimiento de microorganismos que utilizan el desecho orgánico como fuente de alimentación, y como consecuencia de su crecimiento, ponen en riesgo la salud pública debido a su potencial patógeno.

Avidesa Mac Pollo S.A. cuenta con diferentes plantas distribuidas a lo largo de Bucaramanga, Santander y sus zonas metropolitanas, entre estas destacan:

- Granjas avícolas donde se cría y se da engorde a los pollos.
- Planta de Beneficio ubicada en Floridablanca, Santander.
- Planta de almacenamiento y refrigeración ubicada en Floridablanca, Santander.
- Planta de Alimentos ubicada en Girón, Santander.
- Planta de Harinas ubicada en Girón, Santander.

En donde se generan cantidades importantes de agua residual que deben ser tratadas para su adecuada disposición. Todos los componentes orgánicos pueden generarse en el proceso de beneficio de pollo (lavado de estiércol, durante la matanza y desangrado, recambio de agua en chillers y escaldadoras, escaldado, pelado, corte de la carne, patas, cabezas, extracción y manejo de vísceras, limpieza de mollejas y manejo de subproductos avícolas) o en los tratamientos de subproductos que no tienen un valor comercial considerable. El inorgánico se refiere a sustancias contaminantes introducidas de carácter inorgánico, originadas en el uso de químicos para limpieza y desinfección de pisos, equipo y maquinaria industrial, las cuales deterioran su calidad física y química, estas sustancias van desde materiales inertes en suspensión, hasta materiales tóxicos en dilución, los

cuales convierten el agua residual en un impactante factor de desequilibrio de los ecosistemas acuáticos y su entorno.

En la planta de harinas (ver figura 1) se realiza el tratamiento de los diversos subproductos del beneficio de los pollos como lo son: vísceras, plumas, picos, patas, sangre, entre otros, con el propósito de obtener harina que luego será procesada para la producción del concentrado para los pollos, este proceso representa un ahorro económico para la empresa, ya que gran parte del alimento de engorde de los pollos proviene de sus subproductos. El proceso producción de harina a partir de los subproductos de beneficio se puede dividir en los siguientes subprocesos (ver tabla 1).

Tabla 1. Subsistemas de la planta de harinas.

SUBSISTEMAS PLANTA DE HARINAS	DESCRIPCIÓN	EQUIPOS EMPLEADOS
Subsistema de carga	Encargado de almacenar los subproductos y transportarlos hacia el subsistema de cocción	Tolvas de almacenamiento, tornillos sin fin de transporte, cañería de recolección de agua residual
Subsistema de generación de vapor	Encargado de suplir la energía térmica necesaria para realizar el proceso de cocción y mantener el aceite necesario para lubricación de equipos a temperatura adecuada	Caldera de carbón, calderas a gas, redes de distribución de vapor, tratamiento de condensados
Subsistema de cocción	Encargado de elevar la temperatura de los subproductos, extraer la mayor parte de su humedad y formar la base para la harina.	Cookers de vapor, cookers por hidrolisis, sistema de purga de condensados
Subsistema de secado	Encargado de eliminar la humedad residual de la harina y pulverizarla.	Horno secador de harina, molinos trituradores
Subsistema de Condensación de vapor residual	Encargado de condensar el vapor residual que se genera en el subsistema de cocción	Intercambiadores de calor vísceras, intercambiador de calor plumas, torres de enfriamiento, tanques de expansión

Subsistema de manejo de residuos solidos	Encargado de almacenar y recolectar los residuos sólidos que se generan en todo el proceso, para su posterior transporte a plantas de procesamiento	Almacén de residuos sólidos, basculas
Subsistema de manejo de residuos fluidos	Encargado de recolectar procesar y limpiar principalmente el agua contaminada que generan los subsistemas de la planta y los gases no condensables que fluyen junto al vapor residual.	Planta de tratamiento de aguas residuales, lavadores de gases, quemadores de gases, separador hidrotangencial
Subsistema de empaque y distribución	Encargado de empacar, transportar y almacenar la harina seca y triturada.	Silos de almacenaje, bandas de transporte, empacadoras

El concentrado es fruto de diversos procesos como los térmicos que se realizan en la planta de harinas y tienen como objetivo la cocción y secado de los diversos subproductos provenientes de las otras plantas de la empresa, para tal fin se emplea vapor proveniente de las calderas presentes en la planta (ver figura 2), este vapor ingresa a los diversos cocedores o cookers que cocinan los subproductos mediante los procesos de transferencia de calor.

Figura 1. Planta de Harinas de Avidesa Mac Pollo S.A.



Figura 2. Caldera principal de la planta de harinas de Avidesa Mac Pollo S.A.

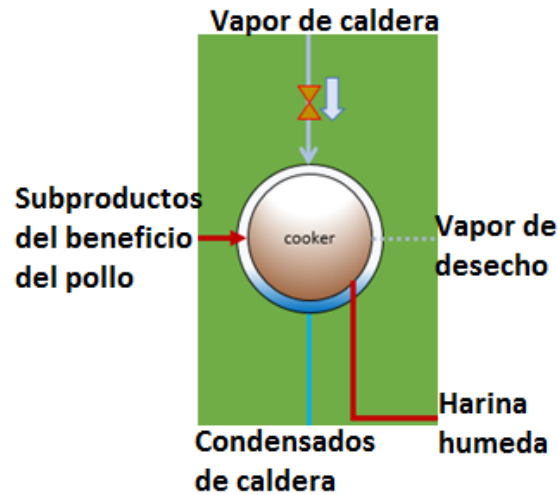


La planta cuenta con tres calderas generadoras de vapor, dos de 500 bhp y una de 200 bhp de capacidad, normalmente se encuentra en funcionamiento una caldera de 500 bhp que es alimentada con carbón como combustible, la cual recibe la denominación de caldera principal, el vapor se envía al distribuidor permitiendo la dosificación hacia cada uno de los cookers y a los tanques de calentamiento de aceite. Se tienen 8 cookers en total, de los cuales 3 se usan para cocinar plumas mediante un proceso de hidrólisis, 4 se usan para cocinar vísceras con un flujo continuo de vapor y el último se usa para la cocción de los diferentes lodos presentes en los subproductos del beneficio. Los procesos de cocción duran aproximadamente por cada bache de carga 3 horas para las vísceras y 2 horas para las plumas.

Figura 3. Cooker de vísceras número 4 de la planta de harinas de Avidesa Mac pollo S.A.

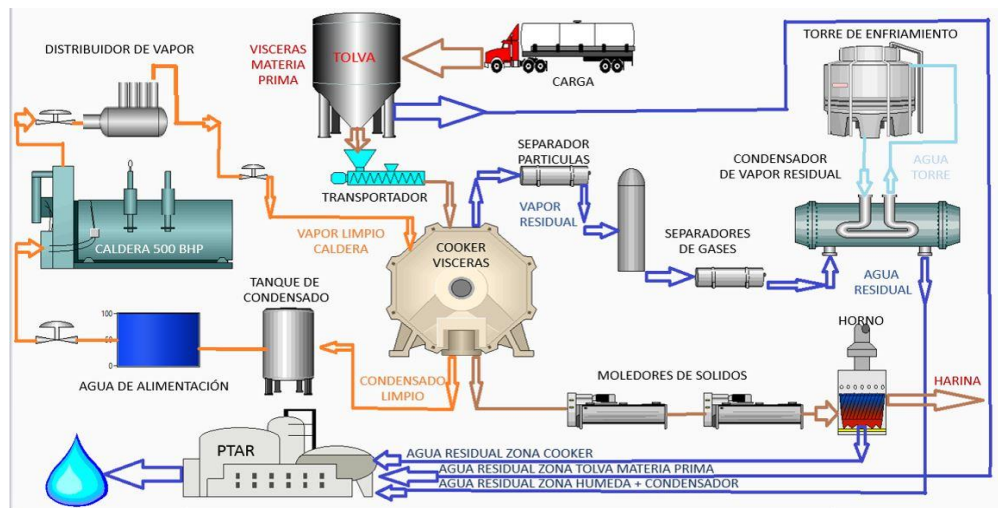


Figura 4. Esquemático del cooker.



Los subproductos se componen principalmente de materia prima sólida y humedad, es por esta razón que al realizarse el proceso de cocción, la humedad presente en cada subproducto se desprende en forma de vapor y este vapor se conoce como vapor de desecho; el vapor proveniente de la caldera se condensa y retorna al tanque de alimentación (ver figura 5), cabe resaltar que el vapor de la caldera nunca entra en contacto directo con la materia prima de cocción gracias a un sistema de inyección tipo chaqueta, por consiguiente, el vapor condensado no resulta contaminado.

Figura 5. Esquema de los procesos presentes en la planta de harinas de Avidesa Mac Pollo S.A (para un solo cooker).



La planta de harinas genera tres corrientes de agua residual (ver tabla 2) cada una con un nivel de contaminación diferente a la otra, las corrientes se catalogan según su zona de procedencia (ver figura 6) en la zona de tolva y materia prima, la zona de los cooker y la zona húmeda (aseo general de instalaciones) junto a los condensadores del vapor residual de cada cooker, todas las corrientes de agua contaminada se unen y se dirigen a la PTAR (planta de tratamiento de aguas residuales, ver figura 7), sin embargo debido a la excesiva concentración de contaminantes la PTAR no logra garantizar la calidad del agua a la salida, la cual es enviada posteriormente al río más cercano que está ubicado a las afueras de las instalaciones, por esta razón se hace necesario desarrollar un sistema adicional que garantice que el agua residual tratada cumpla con los requisitos de la normativa colombiana (INVIMA) y que además aumente el rendimiento energético de la planta al usar la energía residual del vapor de desecho (ver figura 8)

Tabla 2. Corrientes de agua residual en la planta de harinas.

ZONA DE FLUJO	DESCRIPCIÓN
Tolva de materia prima	Corresponde a la zona que recauda el flujo de agua más contaminado, el cual corresponde al agua desprendida por los subproductos durante la carga, además, del agua de desecho de los tanques de expansión del subsistema de condensación.
Húmeda y condensadores	Corresponde a la zona que recauda los flujos de agua correspondientes al aseo de las instalaciones y al condensado residual que se obtiene producto de la condensación del vapor residual generado en el subsistema de cocción
Cookers	Corresponde a la zona que recauda los flujos correspondientes a la purga de condensados del horno, los cookers y las calderas

Figura 6. Distribución de los diferentes flujos de agua en la planta de harinas de Avides Mac Pollo S.A.

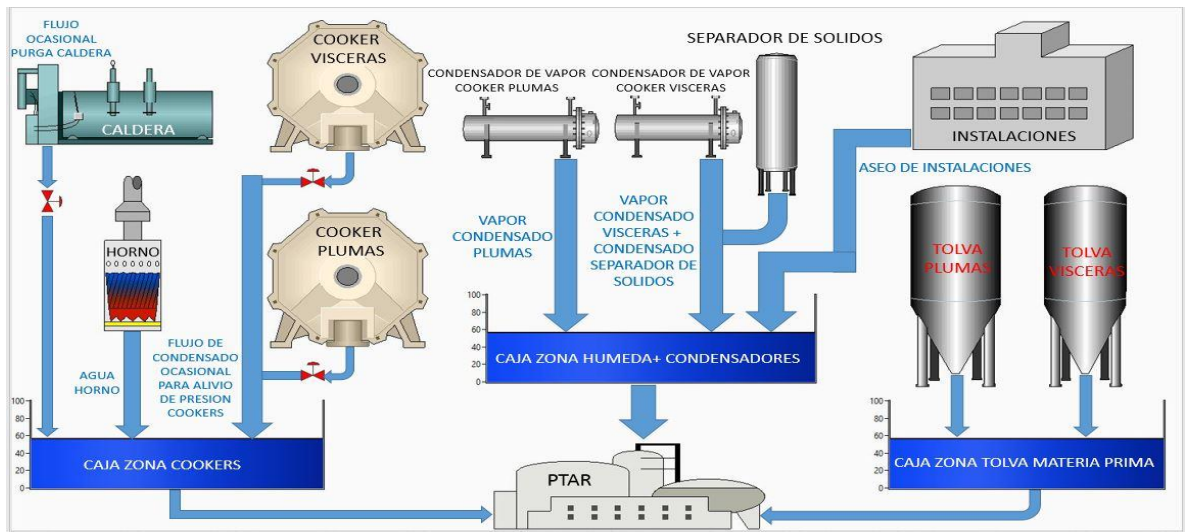


Figura 7. PTAR de la planta de harinas de Avides Mac Pollo S.A.



Figura 8. Esquemático del sistema de post tratamiento de agua.



INVIMA establece según la Resolución N° 0631 art. 9 de 2015 del MADS los siguientes niveles límites de contaminantes para aguas residuales de aplicaciones avícolas:

Tabla 3. Valores máximos permitidos para vertimientos puntuales de agua residual según el MADS.

Parámetro	Unidades	Beneficio de aves de corral
pH	Und. pH	6 a 9
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg O ₂ /L	650
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg O ₂ /L	300
Sólidos Suspendedos Totales (SST)	mg/L	100
Sólidos Sedimentables (SSED)	mg/L	2
Grasas y aceites	mg/L	40
Cloruros (Cl)	mg/L	250
Sulfatos (SO ₄)	mg/L	250

Fuente: Resolución N° 0631 art. 9 de 2015 del MADS del gobierno de Colombia.

Avidesa Mac Pollo S.A. en pro de solucionar este problema ha venido adelantando estudios de caracterización de las aguas residuales de la planta de harinas. En la tabla 4 se pueden observar estas corrientes con sus respectivas concentraciones de los contaminantes más relevantes, las cuales fueron tomadas justo después del proceso, es decir, sin ser tratados en la PTAR; además, se conocen los flujos volumétricos de estas corrientes (ver tabla 5).

Tabla 4. Parámetros contaminantes críticos presentes en las aguas residuales de la planta de harinas de Avidesa Mac Pollo S.A.

Parámetros	Zona de muestra puntual			
	Zona húmeda + condensados	Tolva de materia	Cooker	PTAR
Cloruros (mg/l)	217	960	8	293
DQO (mg/l)	1255	42650	215	742
pH	9,12	8,53	6,01	Acorde con la norma
Sulfatos (mg/l)	20	110	7	69
Sólidos suspendidos (mg/l)	288	9740	72	30

Tabla 5. Flujos volumétricos de aguas residuales presentes en la planta de harinas de Avidesa Mac Pollo S.A.

CAUDALES PUNTUALES POR ZONA			
ZONA HUMEDA +CONDENSADORES	TOLVA MATERIA PRIMA	COOKER	PTAR
0,84 [L/s]	0,3 [L/s]	0,53 [L/s]	1,67 [L/s]

Al analizar las tablas anteriores se observa claramente que la zona húmeda y la zona de tolva y materia prima presentan niveles de contaminación excesivamente altos, lo cual imposibilita que la PTAR (Planta de Tratamiento de Agua Residual) pueda garantizar los niveles correctos establecidos por la norma colombiana. Una de las mejores formas de disminuir los principales contaminantes del agua residual es la utilización de un sistema térmico de depuración que garantice la disminución del DQO (Demanda Química de Oxígeno), la deposición de sólidos y cloruros, justificando así la ejecución de este proyecto de grado, ya que se obtendrán valores dentro de la normativa gracias a la construcción de un sistema adicional que ayude en el tratamiento de estas aguas residuales.

Para tal fin se necesita una fuente de calor, que se resume en un aumento en los costos de producción de la harina y del consumo energético de la planta, sin embargo, cabe resaltar que actualmente existe energía no aprovechada que es proveniente del vapor en la etapa de cocción, el cual pasa por un intercambiador de calor de casco y tubos que lo condensa mediante la recirculación de agua de una torre de enfriamiento. Se hará una línea adicional para extraer parte del vapor proveniente de la etapa de cocción de las vísceras, con la finalidad de usarlo como fuente energética del destilador de aguas residuales.

Figura 8. Condensador de vapor de desecho utilizado actualmente.



Figura 9. Torre de enfriamiento acoplada al condensador.



Se justifica nuevamente este proyecto de grado, con el fin de afianzar la relación academia-industria y dar solución al problema de contaminación de las aguas residuales de la planta de harinas, sin la necesidad de una fuente de energía externa que aumente de costos de operación.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Fortalecer la relación academia-industria contemplada en la misión institucional de la Universidad Industrial de Santander, mediante la implementación de un prototipo de sistema térmico que permita la limpieza del agua residual generada por los subproductos del proceso de beneficio de los pollos en la planta de harinas de Avidesa Mac Pollo S. A.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar el estado del arte de los procesos de tratamiento de aguas residuales de la industria avícola colombiana.
- Diseñar y construir un prototipo de sistema térmico para el tratamiento de aguas residuales provenientes de la PTAR (Planta de Tratamiento de Agua Residual), en la planta de harinas de Avidesa Mac Pollo S.A. ubicada en Girón-Santander, con las siguientes características:
 - Flujo de agua residual a tratar igual a 150 [L/hora] proveniente de la PTAR, el cual debe cumplir con los estándares sanitarios de calidad establecidos por la norma colombiana (Res. N° 0631 art. 9, 2015):
 - DQO (Demanda química de oxígeno): 650 [mgO₂/L]
 - DBO (Demanda bioquímica de oxígeno): 300 [mgO₂/L]
 - Cloruros: 250 [mgCl/L]
 - SST (Sólidos suspendidos totales): 100 [mg/L]

- Verificar mediante un análisis de viabilidad la posibilidad de construcción del sistema propuesto a escala real para tratar un flujo de agua residual de 1080 [L/hora].
- Realizar un Manual de operación y programa de mantenimiento del sistema.

3. MARCO TEORICO

3.1 AGUA RESIDUAL

3.1.1 Definición. Las aguas residuales se definen como toda afluyente de agua en la cual se hayan modificado sus propiedades físicas o químicas debido a la adición de otros componentes biológicos, químicos o en su defecto por la adición de energía que ocasione un incremento de la temperatura.

3.1.2 Clasificación.

3.1.2.1 Domesticas. Es toda efluente de agua procedente de viviendas, edificios comerciales e instituciones que han sido usadas para diversas labores, se clasifican en grises y negras. Las aguas grises son aquellas que han sido usadas para limpieza, cocinar, entre otras; las aguas negras son provenientes de sanitarios. Estas aguas presentan alta carga contaminante de solidos suspendidos, materiales orgánicos y químicos usados para la limpieza.

3.1.2.2 Blancas. Es el agua procedente de la lluvia o nieve que termina principalmente en el alcantarillado, presenta diversos tipos de contaminantes ya que depende en gran medida de las sustancias que encuentre desde el momento que toque el suelo hasta que desemboca en el alcantarillado.

3.1.2.3 Industriales. Es el agua generada de todo proceso industrial, muestra diversa variedad de contaminantes que varían dependiendo de la industria donde fue usada, se caracteriza porque debe ser tratada antes de ser vertida a fuentes hídricas o alcantarillado.

3.1.2.4 Agroindustriales. Tienen alto contenido de pesticidas y químicos, debido a que son usadas para la producción de productos agrícolas.

3.1.3 Parámetros de caracterización del agua residual. La caracterización del agua residual define el grado de contaminación, para esto se hace uso de indicadores o parámetros que pueden ser físicos, químicos y biológicos.

3.1.3.1 Parámetros físicos. Son principalmente el olor, color, temperatura, sólidos suspendidos, que pueden ser afectados por la adición de componentes orgánicos o inorgánicos.

3.1.3.2 Parámetros químicos. Los de mayor importancia son el pH, DQO (Demanda Química de Oxígeno), DBO (Demanda Biológica de Oxígeno), sustancias tóxicas, nutrientes, grasas y aceites.

3.1.3.2 Parámetros biológicos. Se caracterizan por la cantidad de bacterias, virus, algas, protozoarios y helmintos presentes en el agua que pueden afectar contra la salud pública o el medio ambiente.

3.1.4 Procesos para el tratamiento de agua residuales.

3.1.4.1 Procesos físicos. Son todos aquellos procesos en los cuales no se modifican las propiedades químicas, tienen como finalidad eliminar las partículas en suspensión como grasas y aceites, los principales procesos son:

Tabla 6. *Procesos físicos para el tratamiento de agua residual.*

PROCESO FÍSICO	DESCRIPCIÓN
Desbaste	Retención de sólidos mediante rejillas o tamices.
Dilaceración	Trituración de materias sólidas arrastradas por el agua
Floculación	Proceso que permite formar coágulos concentrados con el fin de aumentar su volumen y decantarlos

Sedimentación	Separación de partículas suspendidas gracias a la acción de la gravedad.
Flotación	Proceso usado para eliminar materia y suspendida y separar los lodos biológicos del agua

Filtración	Aprovecha membranas porosas por la cual el líquido puede atravesar fácilmente, pero los sólidos no y de esta manera los separa.
Evaporación	Elimina las diversas impurezas disueltas en el agua aprovechando su cambio de estado de líquido a gas cuando esta absorbe el calor necesario.

3.1.4.2 Procesos químicos. Son todos los procesos en los cuales se modifican las propiedades químicas del agua mediante la adición de compuestos químicos que facilitan la remoción de los contaminantes, los principales son:

Tabla 7. *Procesos químicos para el tratamiento de agua residual.*

PROCESO QUIMICO	DESCRIPCIÓN
Precipitación química	Proceso usado para reducir la concentración de metales gracias al uso de floculantes químicos.
Transferencia de gases	Disolución de un gas dentro de agua residual, el cual es extraído con una composición química diferente
Adsorción	Propiedad de algunos materiales de atraer partículas sólidas a su superficie.
Desinfección por cloro	Proceso en el cual se introduce cloro al agua residual para eliminar organismos patógenos.
Aireación	Proceso donde se usa ozono con el fin de oxidar el agua residual y disminuir su toxicidad.
Decloración	Introducción de dióxido de azufre con el fin de eliminar el cloro introducido en el proceso de cloración.

Intercambio iónico	Circulación del agua residual a través de recipientes con partículas aniónicas o catiónicas con el fin de intercambiar partículas contaminantes.
Osmosis inversa	Flujo espontaneo de agua desde una solución diluida hacia una concentrada pasando a través de una membrana semipermeable
Ultrafiltración	Proceso de remoción de partículas a través de membranas a alta presión.

3.1.4.3 Procesos biológicos. Son todos los procesos que tienen como meta remover la materia orgánica, mediante la adición de microorganismos que generalmente son bacterias, hongos o metazoos. Los principales componentes son:

Tabla 8. *Procesos biológicos para el tratamiento de agua residual.*

PROCESO BIOLÓGICO	DESCRIPCIÓN
Aeróbico	Introducción de oxígeno en el agua residual el cual crea un ambiente propicio para que las bacterias consuman la materia orgánica, la reducción de contaminantes se da cuando ya no hay materia que consumir y por lo tanto las bacterias comienzan a morir.
Anaeróbico	Proceso que carece de oxígeno, consiste en fermentar los lodos a altas temperaturas con el fin de separarlos del agua a purificar.
Anóxico	Proceso carente de oxígeno el cual mediante agentes bacterianos permite la eliminación biológica del nitrógeno.

3.2 DESTILACIÓN DE AGUA RESIDUAL

3.2.1 Definición. La destilación de agua residual es un proceso de tratamiento físico mediante evaporación cuya función es separar el vapor de agua de los contaminantes mediante la adición de calor al vacío. El vacío ayuda a generar una diferencia de temperatura entre la fuente emisora de calor (vapor) y fuente receptora (agua residual), debido a la disminución de la temperatura de vaporización del agua residual. Este proceso tiene como resultados dos tipos de agua: una que tiene baja concentración de contaminantes (condensados) y otra que tiene alta cantidad de contaminantes (purga), al final del proceso los condensados tienen mayor proporción que la purga. Para este proceso se requiere un aporte energético, que puede ser constante en todo el proceso o solo inicial, por ejemplo, en la compresión mecánica de vapor (CMV) se requiere una fuente de calor inicial para iniciar el proceso como vapor proveniente de una caldera o vapor de desecho, adicionalmente, se requiere en el transcurso del proceso energía eléctrica para el funcionamiento del compresor.

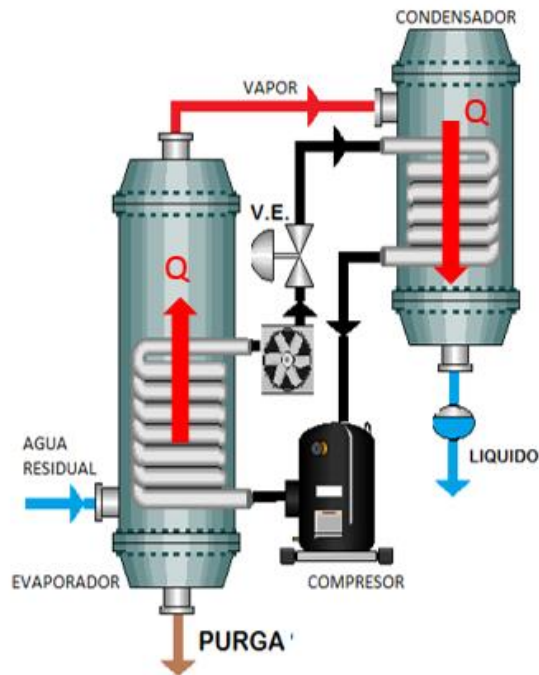
3.2.2 Clasificación de los sistemas de depuración de agua residual. Los principales sistemas para la depuración de agua residual son:

- Compresión mecánica de vapor (CMV).
- Destilación por bomba de calor.
- Destilación por utilización de calor residual.

3.2.2.1 Destilación por compresión mecánica de vapor (CMV). Este sistema se basa en la recuperación del calor de condensación (calor latente) para evaporar el agua de ingreso, este proceso funciona mediante el aumento de la temperatura el vapor como resultado de la compresión mecánica, en este sistema el agua se evapora debido al calor recibido del vapor comprimido, en la figura 10 se puede ver un esquema de este sistema.

sistema mencionado anteriormente, en la figura 11 se puede ver un esquema de este sistema.

Figura 11. Esquema de un sistema de destilación por bomba de vacío.



Sí se hace un balance de energía en la bomba de calor se tiene que el calor del evaporador más el trabajo del compresor es igual que el calor del condensador, por lo tanto, el calor usado para evaporar el agua es igual al calor para condensarla ocasionando que la energía aportada por el compresor no sea extraída del sistema y este sistema nunca pueda alcanzar el estado estable, sin embargo, se recurre al uso de un post-condensador que permite extraer la energía del compresor y alcanzar el estado estacionario.

El problema de este sistema es que requiere el uso de un compresor que consume energía eléctrica, por lo que existe un consumo energético que puede ser bastante alto si se tiene un caudal de agua residual alto.

Los componentes de este sistema son:

Compresor: permite aumentar la presión y temperatura del refrigerante de evaporación a condensación.

Evaporador de la bomba de calor o condensador del sistema de depuración de agua residual: permite condensar el agua residual y evaporar el refrigerante.

Condensador de la bomba de calor o evaporador del sistema de depuración de agua residual: permite evaporar el agua residual y condensar el refrigerante.

Válvula de expansión: permite disminuir la presión y temperatura del refrigerante de condensación a evaporación.

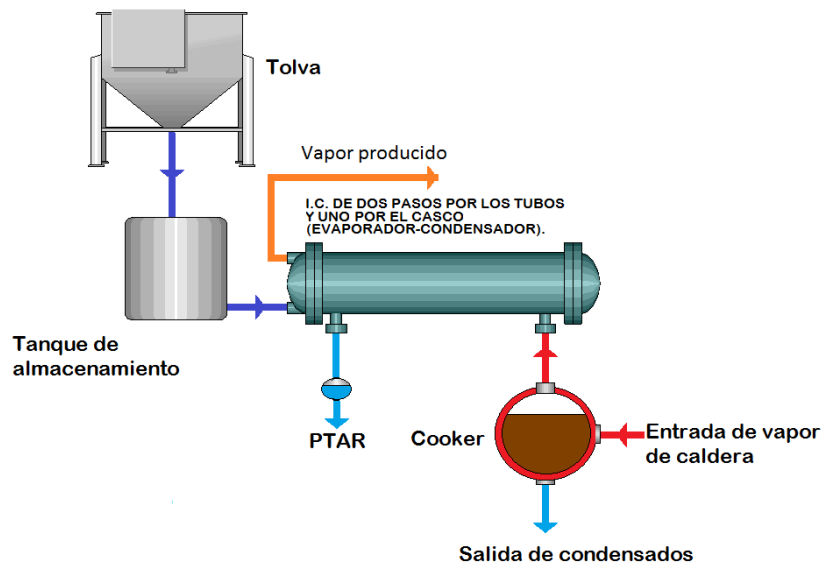
Post-condensador: permite eliminar la energía aportada por el compresor.

3.2.2.3 Destilación 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.

Clasificación de los destiladores de vapor residual según la posición del evaporador:

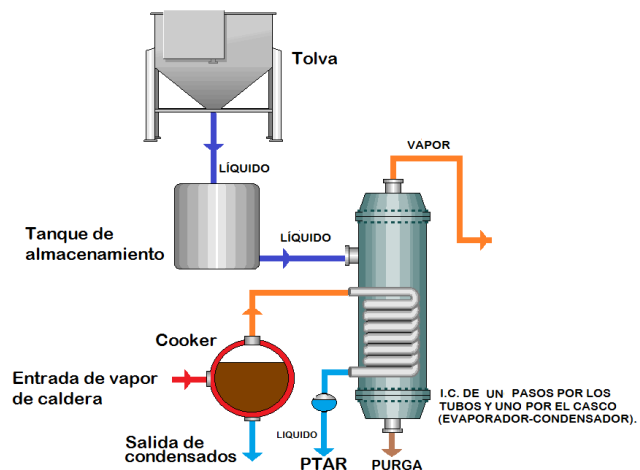
- Evaporador horizontal: Se caracteriza por tener un intercambiador de casco y tubos en forma horizontal, ver figura 12. No es muy eficiente debido a que presenta un coeficiente global de transferencia de calor más bajo en comparación a la ubicación vertical, adicionalmente, requiere que haya bastante espacio en el lugar donde sea instalado y también necesita de un componente adicional que es un separador de vapor con la finalidad de impedir el arrastre de líquido.

Figura 12. Destilador de agua residual con evaporador horizontal.



- Evaporador vertical: presenta un intercambiador en forma vertical (ver figura 13), este tipo de evaporador es muy usado en lugares donde se tiene bastante espacio vertical y poco espacio horizontal, lo que lo hace bastante atractivo, adicionalmente, no requiere de componentes adicionales que eviten el arrastre de líquido haciendo más largo su cabezal superior.

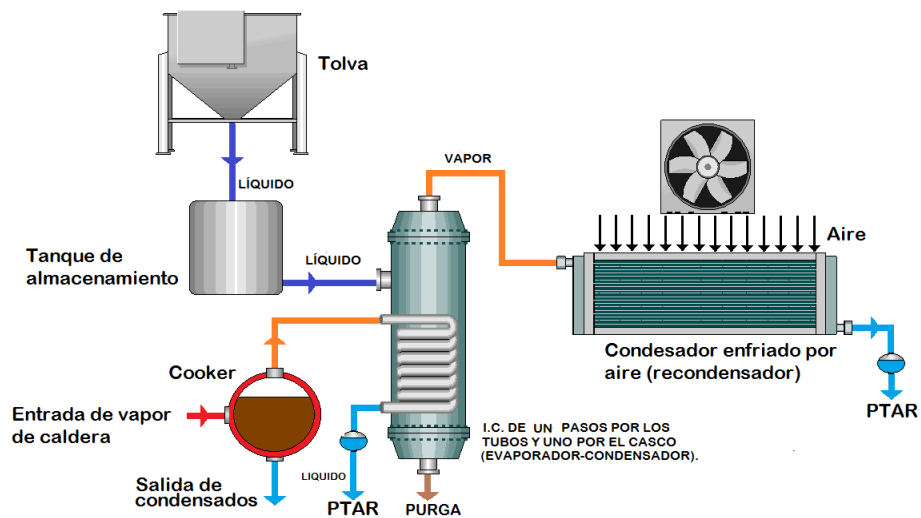
Figura 13. Destilador de agua residual con evaporador vertical.



Clasificación de los destiladores de vapor residual según el tipo de condensador:

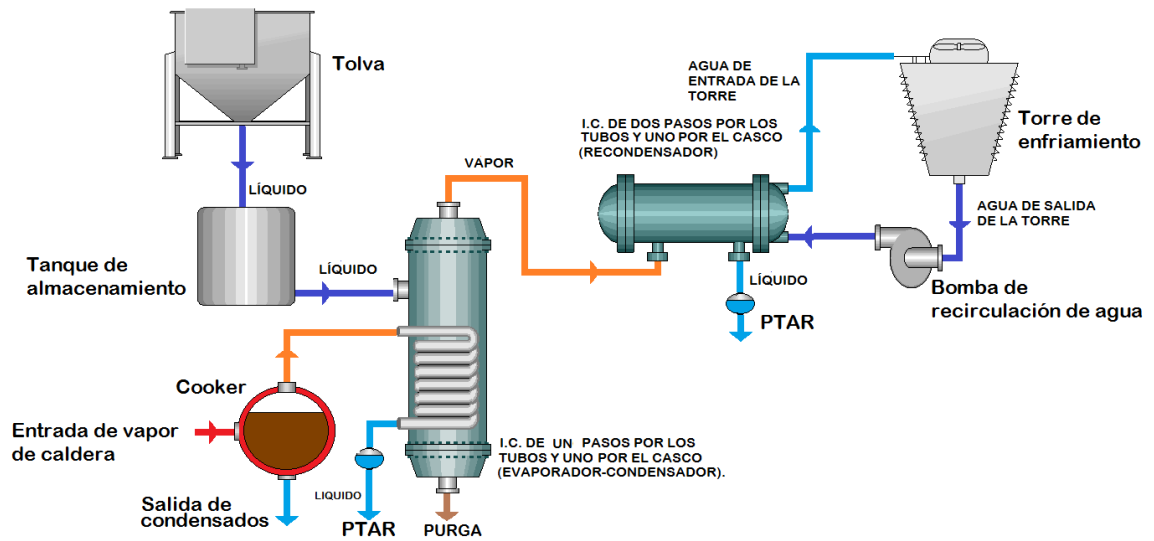
- Condensador enfriado por aire: los condensadores enfriados por aire son muy utilizados en la industria, ya que requieren menos equipos que un condensador enfriado por agua; son muy accesibles en términos económicos y el mantenimiento normalmente puede ser más económico a largo plazo en lugares donde el aire tiene bastante polución, sin embargo, son más grandes y menos eficientes en comparación que los enfriados por agua.

Figura 14. Destilador de agua residual con condensador enfriado por aire.



- Condensador enfriado por agua: son muy utilizados debido a que pueden extraer mayor cantidad de calor en comparación a los enfriados por aire, esto se debe al uso de agua como medio enfriador gracias a una torre de enfriamiento, lo que hace que requiera menos área para cumplir con requerimientos.

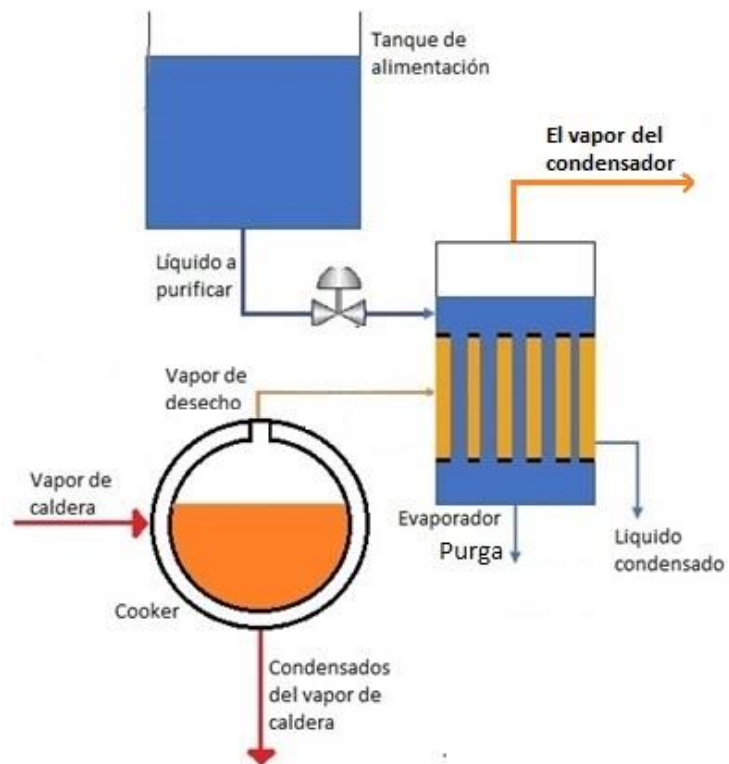
Figura 15. Destilador de agua residual con condensador enfriado por agua.



Clasificación de los destiladores de vapor residual según el número de efectos:

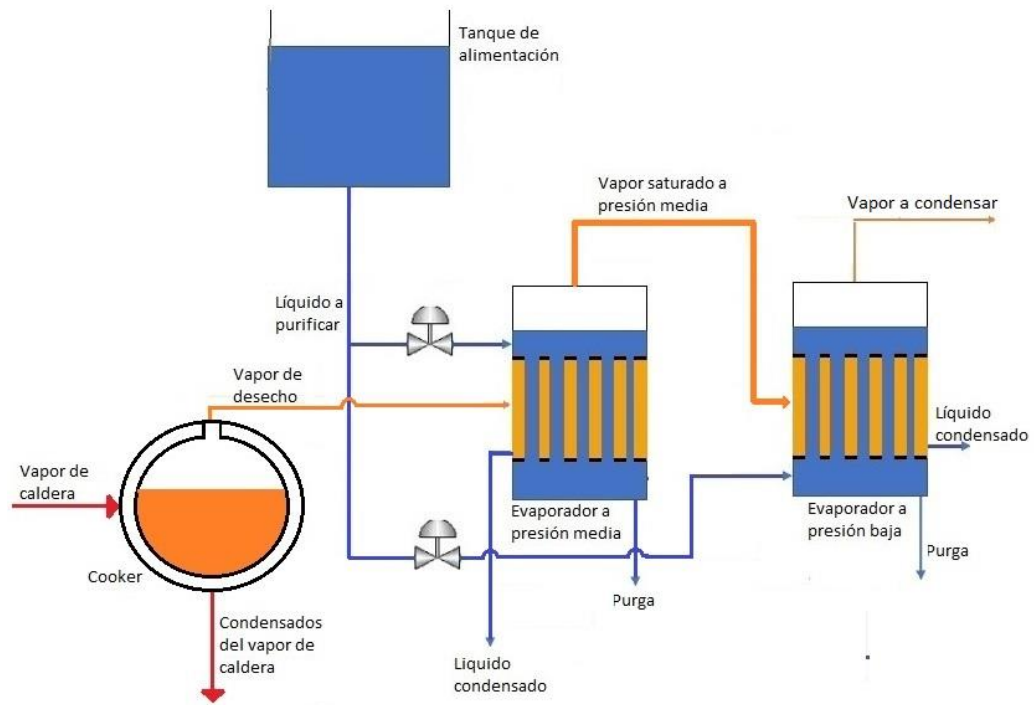
- Efecto simple: Este sistema tiene un evaporador y un condensador (ver figura 16), se caracteriza por tener el flujo másico de agua destilada menor al flujo másico de vapor de alimentación, debido a que entre mayor sea el vacío mayor será el calor latente para evaporar el agua, lo que ocasiona que para un flujo de calor constante se tenga un flujo de agua menor, sin embargo, entre mayor sea el vacío mayor será la diferencia de temperatura ocasionando que se necesite una menor área que se refleja en menor costo de inversión.

Figura 16. Sistema de destilación de agua residual de simple efecto.



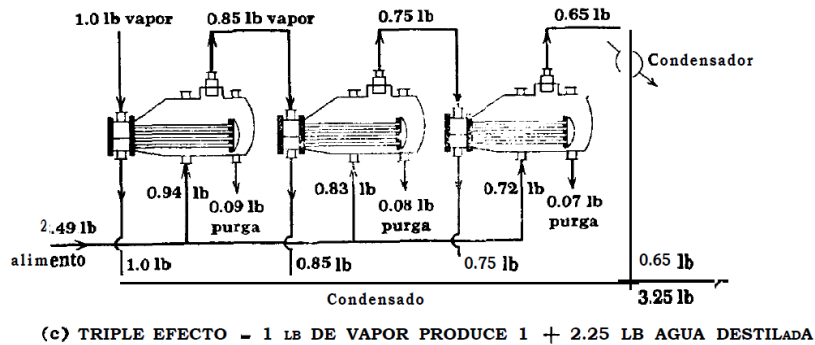
- Doble efecto: este sistema presenta dos evaporadores y un condensador (ver figura 17). El flujo másico destilado es igual a la suma del destilado producido en el primer efecto y en el segundo efecto causando que sea mayor que el vapor de alimentación, para este proceso de transferencia de calor se requiere que existan tres niveles de presión distintas: la presión de vapor de alimentación (presión atmosférica o por encima de esta), presión absoluta del primer evaporador y presión absoluta del segundo evaporador (debe ser mayor el vacío que en el primer efecto).

Figura 17. Sistema de destilación de agua residual de doble efecto.



- Múltiple efecto: tiene tantos evaporadores como el calor disponible lo disponga y el vacío lo permita, son muy eficientes ya que presentan una relación de flujo másico de agua destilada sobre flujo másico de vapor de alimentación mayor que uno, en la figura 18 se puede observar un sistema de destilación de triple efecto.

Figura 18. Sistema de destilación de agua residual de triple efecto.



Fuente: Kern, D. *Procesos de transferencia de calor. Trigesima primera ed. Macgraw Hill Book company. 1999*

4 METODOLOGÍA DE DISEÑO

4.1 SELECCIÓN DEL SISTEMA DE DESTILACIÓN POR CALOR RESIDUAL

Para seleccionar el mejor sistema se recurre a caracterizar las ventajas y desventajas que tiene cada sistema con base en los requerimientos dados por la empresa.

4.1.1 Tipo de evaporador. Se proponen dos tipos de acuerdo con el posicionamiento del intercambiador: horizontal y vertical (ver figura 12 y 13 respectivamente), se seleccionará el mejor con base en los siguientes criterios:

- Costo: se evalúa mediante el área necesitada para suplir el requerimiento dado por la empresa.
- Espacio: se valora con base en el área otorgada por la empresa para construir el sistema.
- Mantenibilidad: facilidad con la que los operarios de la planta podrán realizar la respectiva limpieza.

Ahora se procederá a seleccionar un sistema mediante la ayuda de una matriz QFD.

Tabla 9. Matriz QFD para selección del tipo de evaporador.

Parametros a evaluar	Tipo de evaporador	
	Horizontal	Vertical
Costo	3	4
Espacio	2	5
Mantenibilidad	4	3
Total	9	11

De la tabla anterior se concluye que el mejor tipo de intercambiador es el vertical.

4.1.2 Tipo de subsistema usado para condensar el vapor. Se proponen los dos tipos de enfriamiento más conocidos y accesibles: enfriamiento por aire (ventilador y serpentín) y por agua (torre de enfriamiento e intercambiador de casco y tubos), en la figura 14 y 15 se puede ver un ejemplo de cada uno respectivamente. Se evalúan con los criterios propuestos por la empresa con base en los requerimientos y en los equipos disponibles en la empresa.

- Costo de adquisición y funcionamiento: inversión requerida para obtención de los equipos y gasto energético a lo largo del tiempo.
- Espacio: área requerida por el equipo.
- Eficiencia: capacidad para condensar el vapor.
- Mantenibilidad: costo y facilidad para realizar limpieza.

Tabla 10. Matriz QFD para el subsistema de condensación.

Parametros a evaluar	Tipo de enfriamiento	
	Agua	Aire
Costo de adqui. y funci.	5	2
Espacio	5	3
Eficiencia	4	3
Mantenibilidad	2	4
Total	16	12

El mejor sistema de enfriamiento según lo propuesto por la empresa es el enfriamiento por agua.

4.1.3 Cantidad de efectos. Teniendo en cuenta que el sistema es un prototipo se evaluó entre simple efecto (ver figura 16) y doble efecto (ver figura 17), se tuvieron en cuenta los siguientes criterios de evaluación:

- Costo de fabricación.
- Producción de destilados.
- Eficiencia del sistema.
- Espacio.
- Mantenibilidad.

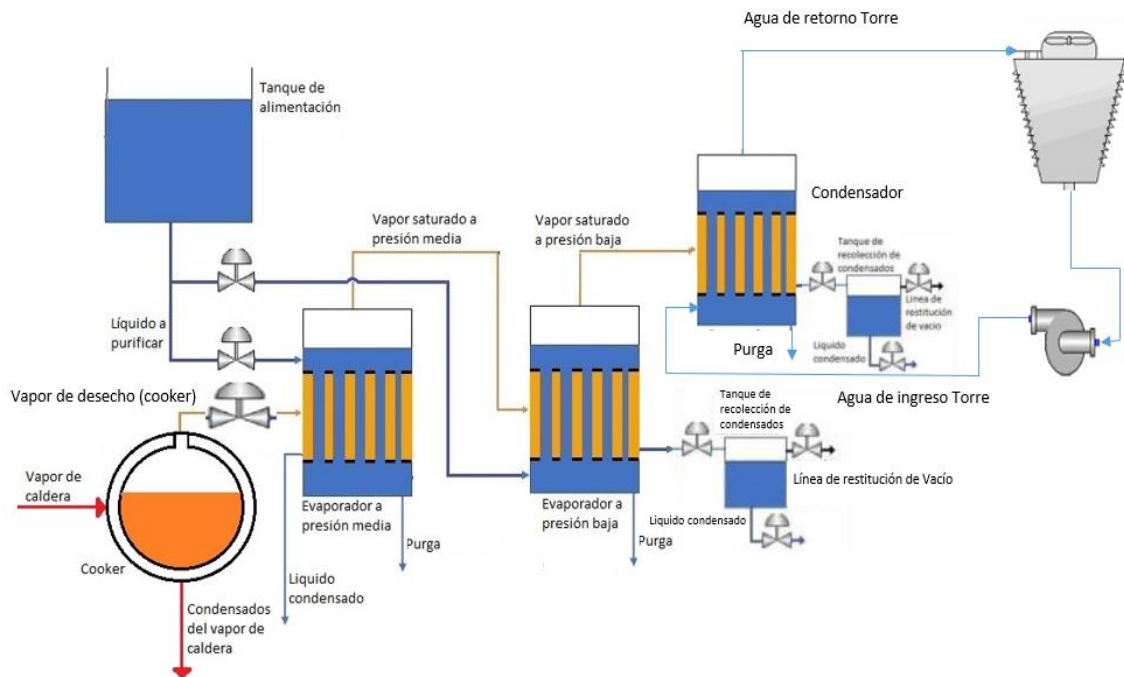
Tabla 11. Matriz QFD para cantidad de efectos.

Parametros a evaluar	Cantidad de efectos	
	Simple	Doble
Costo de fabricación.	4	4
Producción de destilados.	3	5
Eficiencia del sistema.	2	5
Espacio.	4	3
Mantenibilidad.	4	3
Total	17	20

Según la matriz QFD anterior se puede observar que el sistema de doble efecto es la mejor opción para este proyecto.

En la siguiente figura se muestra un esquema del sistema propuesto con base en las mejores opciones seleccionadas anteriormente:

Figura 19. Mejor opción del sistema de destilación por vapor residual.



4.2 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 esta almacenados en el agua contaminada.
- Presión absoluta del primer efecto (60 kPa) y presión absoluta del segundo efecto (30 kPa).
- Se asume que se va a evaporar el 90% del agua de ingreso, con la finalidad de evitar futuras incrustaciones.
- 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 (ver Anexo A.).
- Funcionamiento del sistema por baches por lo que se hacen necesarias las reposiciones de nivel (líquido) y vacío.

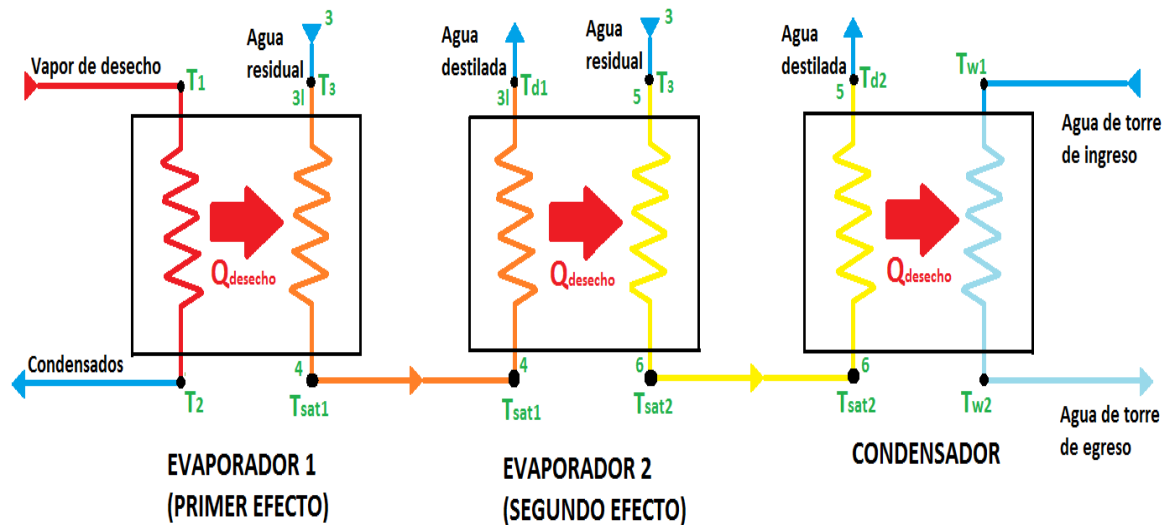
Se tienen como datos iniciales el caudal de agua a tratar (\dot{V}_{agua_t}), la temperatura de ingreso del agua (T_1), la temperatura de vapor de residual (T_c), espesor de tubos sch 40 y presión atmosférica (P_{atm}).

Tabla 12. Datos iniciales

Parametro	Valor
V_{agua_T}	150 [L/h]
T_3	30 [°C]
$T_1 = T_{vap}$	97 [°C]
Espesor tubo	3,56 [mm]
Patm	90,659 [kPa]
P_{absIC1}	60,659 [kPa]
P_{absIC2}	30,659 [kPa]
T_{sat1}	86,25 [°C]
T_{sat2}	69,61 [°C]
Tw1	30 [°C]
Tw2	38 [°C]

En la figura 20 se evidencia un esquema cero dimensional del sistema.

Figura 20. Esquema cero dimensional del sistema de destilación de agua residual.



4.3 MODELAMIENTO TERMODINÁMICO.

Se realiza la primera ley de la termodinámica y el balance de masa en cada uno de los volúmenes de control (ver figura 21) del sistema con el propósito de obtener los parámetros de operación de este, para lograr determinar los valores se debe resolver el siguiente sistema de ecuaciones, ver tabla 13.

Figura 21. Esquema de los volúmenes de control.

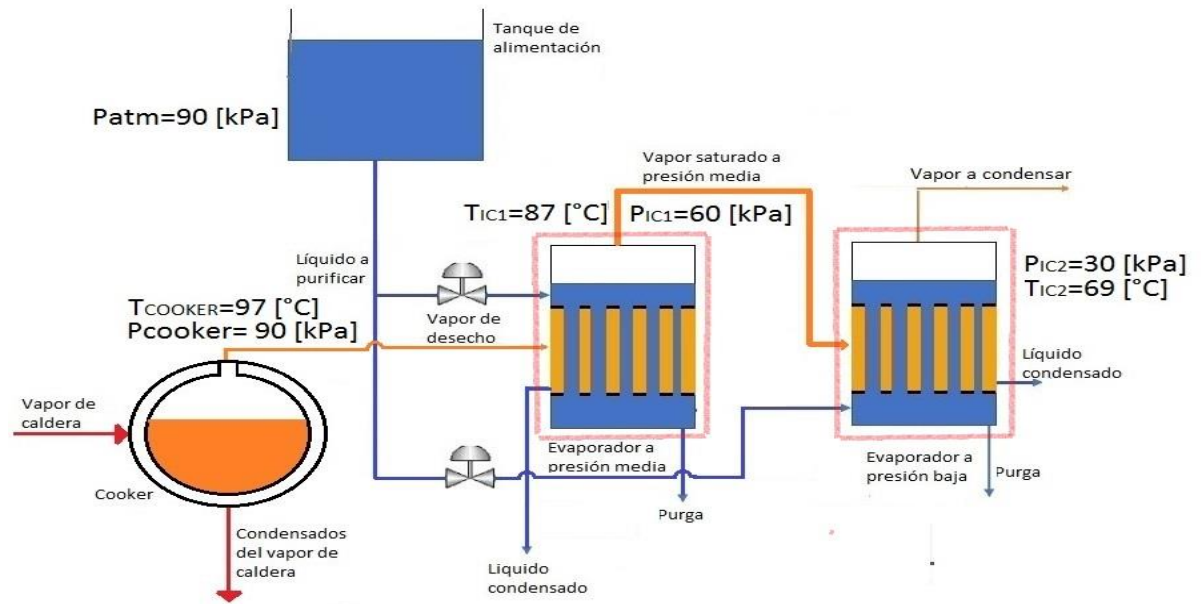


Tabla 13. Balances de masa y energías.

Descripción	Ecuaciones	Valores hallados
Balance de masa en los evaporadores	$\dot{m}_T = \dot{m}_{residual_IC1} + \dot{m}_{residual_IC2}$ $\dot{m}_T = f(\rho_{T1}; \dot{V}_{agua})$ $\dot{m}_{residual_IC1} = \dot{m}_{vap1} + \dot{m}_{purga1}$ $\dot{m}_{vap1} = \dot{m}_{residual_IC1} * 0,9$ $\dot{m}_{residual_IC2} = \dot{m}_{vap2} + \dot{m}_{purga2}$ $\dot{m}_{vap2} = \dot{m}_{residual_IC2} * 0,9$	$\rho_{T1} = 997 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$ $\dot{m}_T = 0,04033 \left[\frac{kg}{s} \right]$

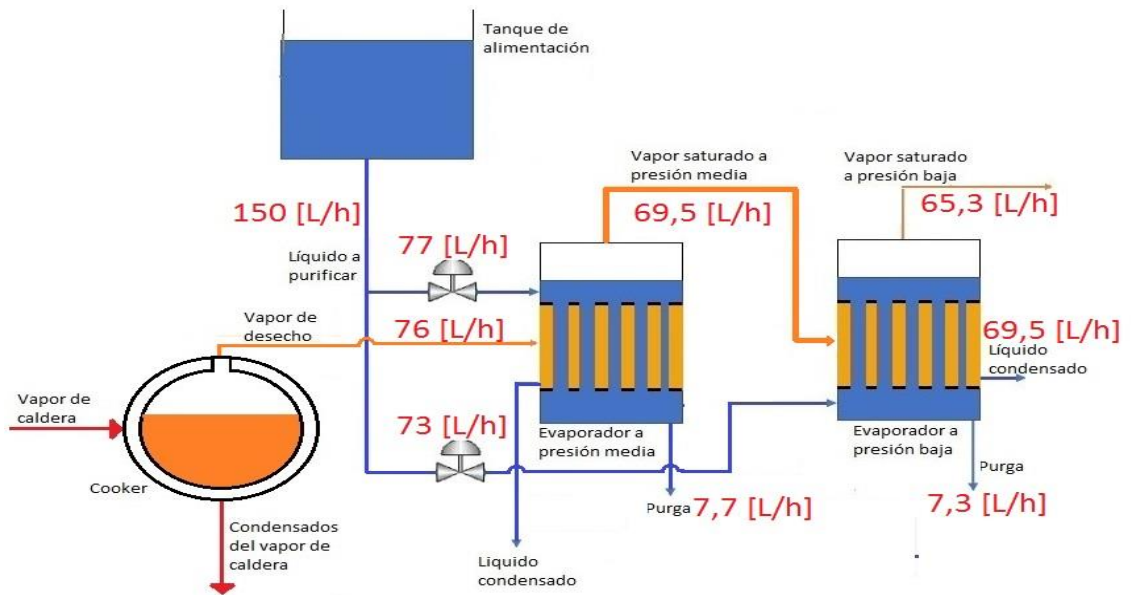
Balance de energía en el primer efecto.	$Q_1 = \dot{m}_c * h_{fgP_{atm}}$ $h_{fgP_{atm}} = h_1 - h_2$ $h_1 = f(P_{atm}; X = 0)$ $h_2 = f(P_{atm}; X = 1)$ $Q_1 - \dot{m}_{vap1} * h_4 - \dot{m}_{purga1} * h_{3l} + \dot{m}_{residual_IC1} * h_3 = 0$ $h_4 = f(T_{sat1}; x = 1)$ $T_{sat1} = f(P_{vacio1})$ $h_{3l} = f(T_{sat1}; x = 0)$ $h_3 = f(T_3; x = 1)$	$h_{fgP_{atm}} = 2,265 * 10^6 \left[\frac{J}{kg} \right]$ $T_{sat1} = 86,25 [^{\circ}C]$ $h_{vap1} = 2,676 * 10^6 \left[\frac{J}{kg} \right]$ $h_4 = 2,653 * 10^6 \left[\frac{J}{kg} \right]$ $h_{3l} = 361 * 10^3 \left[\frac{J}{kg} \right]$ $h_3 = 209 * 10^3 \left[\frac{J}{kg} \right]$
Balance de energía en el segundo efecto.	$Q_2 = \dot{m}_{vap1} * (h_4 - h_{3l})$ $Q_2 - \dot{m}_{vap2} * h_6 - \dot{m}_{purga2} * h_5 + \dot{m}_{residual_IC2} * h_3 = 0$ $h_6 = f(T_{sat2}; x = 1)$ $T_{sat2} = f(P_{vacio2})$ $h_5 = f(T_{sat2}; x = 0)$	$h_6 = 2,625 * 10^6 \left[\frac{J}{kg} \right]$ $h_{3l} = 292 * 10^3 \left[\frac{J}{kg} \right]$

De lo anterior se obtiene:

Tabla 14. Resultados de los balances de masa y energía.

Parametros	Valores
$\dot{m}_{residual_IC1}$	0,02073 [Kg/s]
\dot{m}_{vap1}	0,01866 [kg/s]
\dot{m}_{purga1}	0,002073 [kg/s]
$\dot{m}_{residual_IC2}$	0,01959 [kg/s]
\dot{m}_{vap2}	0,01764 [kg/s]
\dot{m}_{purga2}	0,002959 [kg/s]
Q_1	45916 [w]
Q_2	42770 [w]

Figura 22. Esquema de los flujos de cada intercambiador.



4.4 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 15), con lo cual se usa el método de la LMTD, para esto 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 y que este sea igual para los tres intercambiadores, facilitando la adquisición un solo tubo de 5,8 [m] de longitud para la construcción. Se asumen los siguientes valores:

- Diámetro de tubería los evaporadores: Tubería de 1" sch 40 (Dext=33,4 [mm], Dint=26,6 [mm], Espe=3,38 [mm]), se asume este tipo de tubería debido a la contaminación del agua con lo que se va a garantizar un factor de seguridad en tal caso que haya presencia de corrosión.
- 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 dividir en cuatro partes los tubos del primer evaporador ($L_{IC1_{real}} = 1,45 [m]$ y $L_{IC1_{efectiva}} = 1,419 [m]$) , en cinco partes los tubos del segundo evaporador ($L_{IC2_{real}} = 1,16 [m]$ y $L_{IC2_{efectiva}} = 1,129 [m]$) y en seis partes los tubos del condensador ($L_{IC3_{real}} = 0,96 [m]$ y $L_{IC3_{efectiva}} = 0,93 [m]$), adicionalmente, estos valores no son los efectivos debido a que los tubos van soldados a las placas portatubos.

Tabla 15. Cálculo del número de tubos requeridos para los intercambiadores

Parámetros para calcular	Descripción	Ecuaciones y valores hallados
LMTD	Se calcula la LMTD para los evaporadores como diferencia media de temperatura, debido a que las temperaturas de vaporización son contantes. Para el condensador es necesario calcular la diferencia logarítmica de temperatura Ver figuras 23, 24 y 25.	$LMTD_{IC1} = T_{vap} - T_{sat1} = 10,75 [^{\circ}C]$ $LMTD_{IC2} = T_{sat1} - T_{sat2} = 16,61 [^{\circ}C]$ $LMTD_{condensador} = \frac{T_{sat2} - TW_1 - (T_{sat2} - TW_2)}{\ln \left[\frac{T_{sat2} - TW_1}{T_{sat2} - TW_2} \right]}$ $LMTD_{cond} = 35,5 [^{\circ}C]$

h_{cond}	<p>Se calcula el coeficiente promedio de condensación en toda la superficie con la correlación de Kern (Kern, 1999 p.316),</p>	$h_{cond,vapor}$ $= 0,943 \left(\frac{k_{ic}^3 * \rho_{ic}^2 * \lambda_{ic} * g}{\mu_{ic} * L_{ic} * \Delta T_{ic}} \right)^{\frac{1}{4}}$ $h_{cond,vapor,IC1} = 13098 \left[\frac{W}{m^2 * K} \right]$ $h_{cond,vapor,IC2} = 12860 \left[\frac{W}{m^2 * K} \right]$ $h_{cond,vapor,IC3} = 13577 \left[\frac{W}{m^2 * K} \right]$
h_{vapliq}	<p>Se usa la correlación de Gungor (Gungor & Winterton, 1986)</p>	$h_{vapliq,IC} = E * h_l + S * h_{pool}$ $h_{vapliq,IC2} = 1951 \left[\frac{W}{m^2 * K} \right]$ $h_{vapliq,IC3} = 2235 \left[\frac{W}{m^2 * K} \right]$
$h_{liq,IC3}$	<p>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)</p>	$h_{liq,IC3} = \frac{N_{u,IC3} * k_{f,IC3}}{d_{int,IC3}}$ $N_{u,IC3} = 3,66$ $h_{liq,IC1} = 421 \left[\frac{W}{m^2 * K} \right]$

R_{total}	<p>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 incrustaciones y por vaporización.</p>	$R_{total_{ic}} = \frac{1}{h_{cond_{vapor_{ic}}} * A_{total_{ext_{ic}}}} + \frac{\ln\left(\frac{d_{ext_{ic}}}{d_{int_{ic}}}\right)}{K_{mat_{ic}} * 2 * \pi * L_{IC} * n_{tubos_{ic}}} + \frac{1}{h_{vap_{liq_{ic}}} * A_{total_{int_{ic}}}} + \frac{f_{incrus_{ext_{ic}}}}{A_{total_{ext_{ic}}}} + \frac{f_{incrus_{int_{ic}}}}{A_{total_{int_{ic}}}}$ $R_{total_{ic1}} = 0,0002995 \left[\frac{K}{W} \right]$ $R_{total_{ic2}} = 0,0003882 \left[\frac{K}{W} \right]$ $R_{total_{ic3}} = 0,0009607 \left[\frac{K}{W} \right]$
U	<p>Cálculo del coeficiente global de transferencia.</p>	$U_{ic} = \frac{1}{A_{total_{ext_{ic}}} * R_{total}}$ $U_{ic1} = 765,4 \left[\frac{W}{m^2 * K} \right]$ $U_{ic2} = 813,2 \left[\frac{W}{m^2 * K} \right]$ $U_{ic3} = 303,4 \left[\frac{W}{m^2 * K} \right]$
$A_{total_{ext}}$	<p>Área requerida para la garantizar la transferencia de calor solicitada.</p>	$Q = U_{ic} * A_{total_{ext_{ic}}} * LMTD$ $A_{total_{ext_{ic1}}} = 4,362 [m^2]$ $A_{total_{ext_{ic2}}} = 3,168 [m^2]$ $A_{total_{ext_{ic3}}} = 3,431 [m^2]$

$n_{tubos_{IC}}$	<p>Cálculo del número de tubos totales. Se tomó el número de tubos más grande y se aplicó a todos los equipos con el fin de uniformizar el sistema.</p>	$A_{total_{ext_{IC}}} = n_{tubos_{IC}} * \pi * d_{ext_{IC}} * L_{ic}$ $n_{tubos_{IC1}} = 29,3$ $n_{tubos_{IC1}corregido} = 30$ $n_{tubos_{IC2}} = 26,74$ $n_{tubos_{IC2}corregido} = 27$ $n_{tubos_{IC3}} = 32,5$ $n_{tubos_{IC3}corregido} = 33$
Tp	<p>Se recomienda que el Tube Pitch valor sea igual a dos [TEMA] debido a que todos los tubos que van soldados a la placa portatubos.</p>	$Tp=2 \text{ [in]}$
LTP	<p>Separación diagonal, se asume un arreglo de 45° para facilitar limpieza y mejorar el coeficiente de transferencia de calor.</p>	$LTP = Tp * d_{ext_{IC1}} = 0,0668 \text{ [m]}$

DOTL	<p>Diameter Outside Tube Layout (ver figura 26).</p> <p>Se decide seleccionar el mismo diámetro de tubo de casco, con la finalidad de comprar un solo tubo de 5,8 [m], por lo cual se realizará un solo calculo con la mayor cantidad de tubos.</p>	<p>Según el HEDH (Heat Exchanger Design Handbook) para un arreglo de tubos de 45°.</p> $DOTL = 1,1 * LTP * \sqrt{NTT} + d_{ext_{IC1}}$ $DOTL = 0,3996 [mm]$
Lbb	<p>Dato tomado de experiencias de diseño que facilita el montaje del cabezal y la placa portatubos.</p>	<p>Lbb=0,04[m]</p>
Di_{coraza}	<p>Diámetro interno de coraza</p>	$Di_{coraza} = DOTL + Lbb = 0,436 [m]$
$Di_{coraza_{nominal}}$	<p>Se selecciona el primer diámetro nominal comercial por encima de este valor, se asume que la cedula es 10, este espesor será posteriormente corroborado en el diseño mecánico.</p>	$Di_{coraza_{nominal}} = 0,4445 [m]$ $De_{coraza_{nominal}} = 0,4572 [m]$ $e_{coraza_{nominal}} = 0,00635 [m]$ $D_{nominal} = 18 [in]$

Figura 23. Esquema de la distribución de temperaturas del primer efecto.

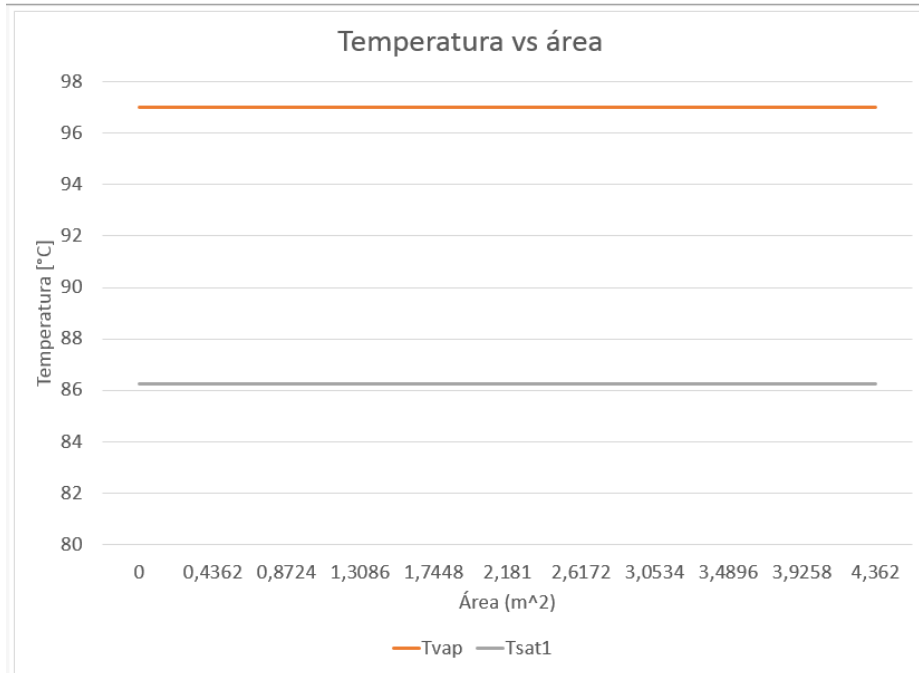


Figura 24. Esquema de la distribución de temperaturas del segundo efecto.

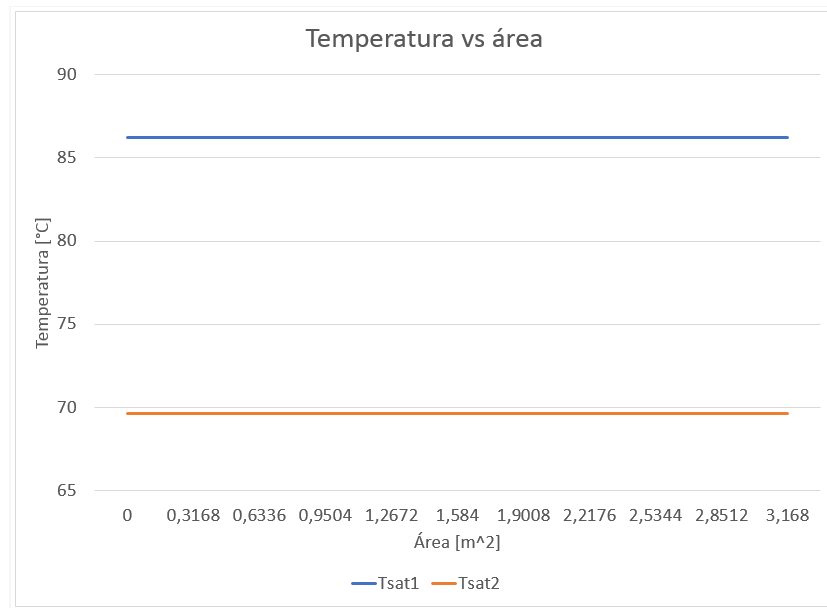


Figura 25. Esquema de la distribución de temperaturas del condensador.

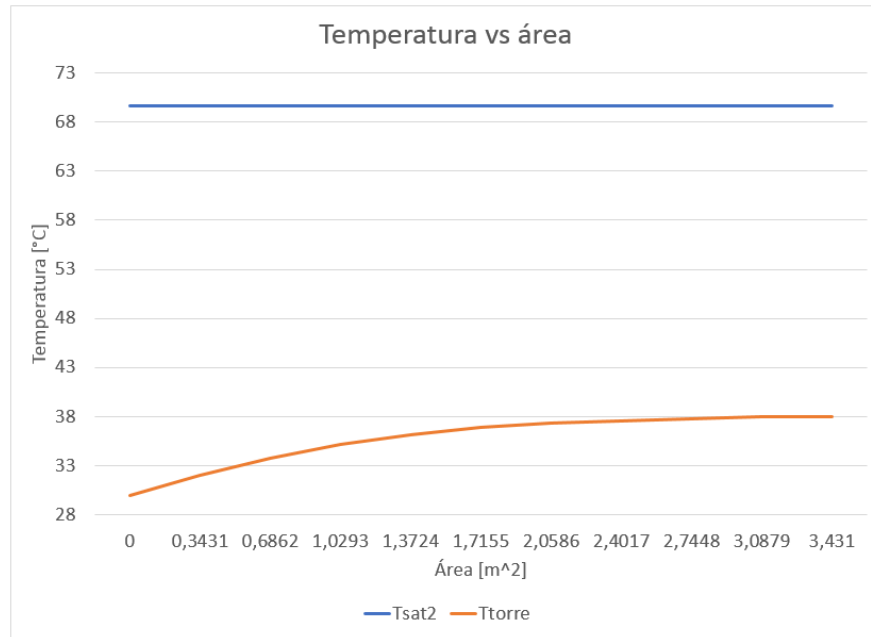
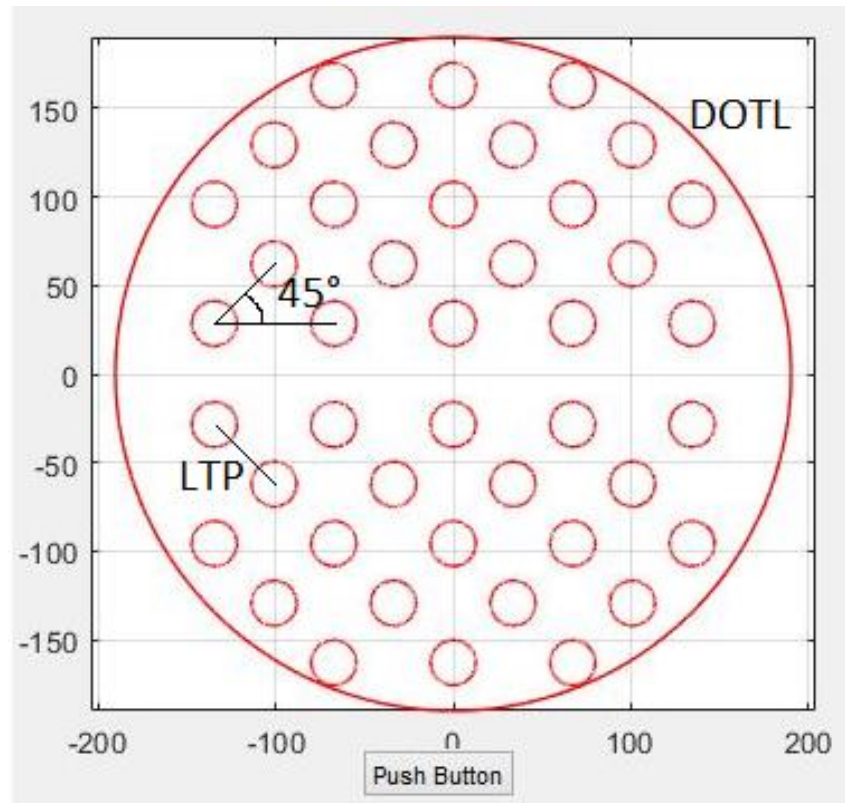


Figura 26. Distribución de tubos.



4.5 DISEÑO MECÁNICO

Finalizado el diseño térmico de cada uno de los componentes del sistema se determinaron las dimensiones globales que garantizaban el proceso de transferencia de calor las cuales fueron: el área de transferencia de cada equipo, el número de tubos totales dentro de cada equipo y los diámetros de coraza y tubos para cada uno de los equipos.

Ahora, mediante el diseño mecánico el cual se basa en la norma ASME y la TEMA las cuales se enfocan en el diseño de recipientes a presión e intercambiadores de calor respectivamente, se pretende determinar con base en las presiones externas de diseño del sistema los espesores necesarios de los tubos, las dimensiones de las bridas de unión, tapas superiores y los soportes necesarios para que el sistema resista las cargas a las que se encuentra sometido.

4.5.1 Cálculo del espesor mínimo necesario en los tubos y la coraza. Con base en el procedimiento de cálculo para la determinación de espesores de corazas sometidas a presiones externas el cual se presenta en la norma ASME sección VIII división I parágrafo UG-28 se procede a asumir un espesor comercial (cedula) para el tubo de 18" correspondiente a la coraza y para los tubos de 1".

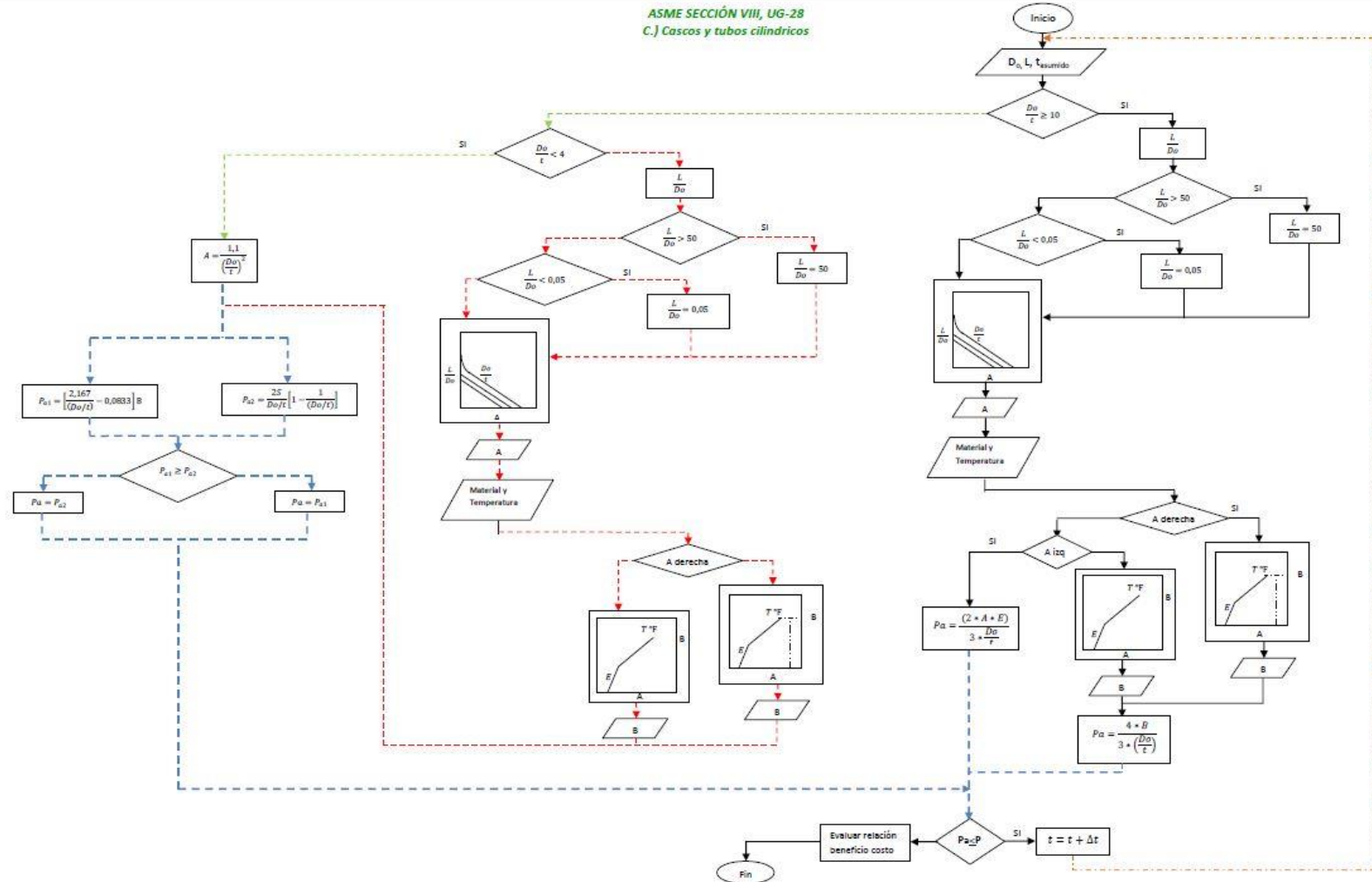
Se tomó un acero inoxidable tipo 410 sch 10 y sch 40 para la coraza y los tubos respectivamente los cuales según la norma ASME sección II poseen un esfuerzo último de fluencia (S_y) de 28400 psi a una temperatura de operación de 98°C y un módulo de elasticidad (ϵ) de $29 \cdot 10^6$ psi, se calcularon las relaciones L/D (longitud sobre Diámetro) y D/e (Diámetro sobre espesor) y se procedió a realizar el procedimiento indicado en la norma el cual se muestra en la figura 27.

Después de realizar el proceso descrito se obtuvo que las presiones de vacío que soportarían los espesores asumidos son mucho mayores a la presión de vacío máxima a la que se somete el sistema por tanto se seleccionan los espesores mencionados anteriormente.

Tabla 16. Presiones de vacío soportadas para los espesores seleccionados.

PRESION	psi
Casco SCH 10	666,7
Tubos SCH 40	2294,7
Máxima en operación	8,7

Figura 27. Procedimiento de cálculo para espesores de recipientes sometidos a presión externa según la norma ASME sección VIII UG-28.



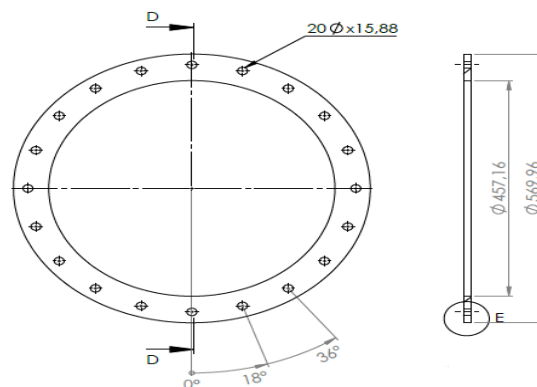
4.5.2 Cálculo de las bridas de unión. Con base en el procedimiento de cálculo para la determinación de las dimensiones de bridas tipo ring a presiones externas el cual se presenta en la norma ASME sección VIII división I apéndice Mandatorio 2 se procede a calcular los momentos flectores y los diversos factores de diseño que permiten calcular los esfuerzos a los que se someterían las bridas en su operación partiendo del hecho de que se asume un espesor, además de sus dimensiones, el número de tornillos y su diámetro necesario para satisfacer las cargas impuestas, el material seleccionado para las bridas fue el mismo que el seleccionado para los tubos y las corazas.

A continuación, se muestran los resultados de la hoja de cálculo que evidencia el proceso realizado con base a la norma para determinar las dimensiones de las bridas (ver tabla 17), dicha hoja de cálculo se muestra en el anexo B.

Tabla 17. Resultados obtenidos del diseño de las bridas con base a la norma ASME.

PARAMETRO	
Diámetro interior (in)	18
Diámetro exterior (in)	22 ½
Diámetro del tornillo(in)	¾
Numero de tornillos	20
Espesor de brida (in)	¼
Ancho efectivo del empaque (in)	¼
Diámetro efectivo del empaque (in)	20

Figura 27.a. Esquemático de las bridas diseñadas.



4.5.3 Diseño de soportes. Se debe garantizar que los soportes sean capaces de aguantar las cargas que afectan al intercambiador, ya sean por el peso o por sismos, para esto se realiza el proceso descrito en la tabla 18, cargas por viento no se tendrán en cuenta debido a que en el lugar donde están ubicados los intercambiadores la acción del viento no es considerable.

Datos conocidos:

- Temperatura de saturación del agua 70 [°C] a una presión absoluta de 30 [kPa], se toma este valor ya que entre menor es la temperatura mayor será el peso para un volumen fijo.
- Densidad de agua líquida a 70 [°C] es igual a 977,7 [Kg/m³].
- Densidad del acero inoxidable AISI 304 a 70 [°C] es igual a 7980 [Kg/m³].

Tabla 18. Cálculo de los soportes.

Parámetro para calcular	Descripción	Ecuaciones y valores hallados
Volúmenes (V)	Para calcular la carga por peso se requiere calcular la masa de cada uno de los elementos, por lo cual se tiene el volumen del agua, casco, tubos y tapas principalmente.	$V_{agua} = Dint_{casco}^2 * \frac{\pi}{4} * L_{inundada}$ $V_{agua} = 0,2759 [m^3]$ $V_{casco} = (Dext_{casco} - Dint_{casco})^2 * \frac{\pi}{4} * L_{total}$ $V_{casco} = 0,05244 [m^3]$ $V_{tubos} = (Dext_{tubo} - Dint_{tubo})^2 * \frac{\pi}{4} * L_{tubo} * n_{tubos}$ $V_{tubos} = 0,0003726 [m^3]$ $V_{tapas} = Dext_{bridas}^2 * \frac{\pi}{4} * e_{bridas}$ $V_{tapas} = 0,002431 [m^3]$
		$M_{agua} = V_{agua} * \rho_{agua}$

Masas (M)	Masas de cada elemento	$M_{agua} = 539,5 [kg]$ $M_{casco} = V_{casco} * \rho_{inox304}$ $M_{agua} = 418,5 [kg]$ $M_{tubos} = V_{tubos} * \rho_{inox304}$ $M_{tubos} = 148,7 [kg]$ $M_{tapas} = V_{tapas} * \rho_{inox304}$ $M_{tapas} = 19,4 [kg]$
Carga total (W)	Peso total que está interviniendo en el evaporador.	$w = M_{agua} + M_{casco} + M_{tubos} + M_{tapas}$ $w = 1126 [kgf]$
Carga por soporte.	Se calcula la carga que va a aguantar cada soporte (3), con un factor de seguridad de 3.	$W_{corregido} = 3 * \frac{w}{3}$
Carga por sismos.	Carga que los soportes van a resistir por la presencia de sismos (C=0,64 coeficiente sísmico para Bucaramanga)	$Fs = C_{sismos} * W_{corregido}$ $Fs = 2162 [Kgf]$
Fuerza critica	La fuerza critica va a ser igual a la suma de la fuerza por peso y la fuerza por sismos.	$F_{critico} = w_{corregido} + Fs$ $F_{critico} = 3288 [Kgf]$
Esfuerzo	El esfuerzo se calcula como la fuerza sobre el área que soporta la carga.	$A_{soporte} = 6,624 [cm^2]$ $\sigma_{soporte} = F_{critico} / A_{soporte}$ $\sigma_{soporte} = 496,38$

Comparación entre el crítico y el permisible.	Perfil seleccionado tipo c de 3x3 ASTM A 36.	$S_{y_{ASTM_{A572}}} = 2530 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]$ $S_{y_{ASTM_{A572}}} > \sigma_{soporte}$
---	--	--

De lo anterior se concluye que los esfuerzos seleccionados soportan la carga del sistema.

5 CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DEL SISTEMA

Con base en el diseño en detalle y en modelo CAD (anexo C) se procedió a realizar el proceso de construcción y montaje de cada uno de los equipos necesarios para el desarrollo del sistema, a continuación, se muestra en la tabla 19 los equipos que fueron construidos.

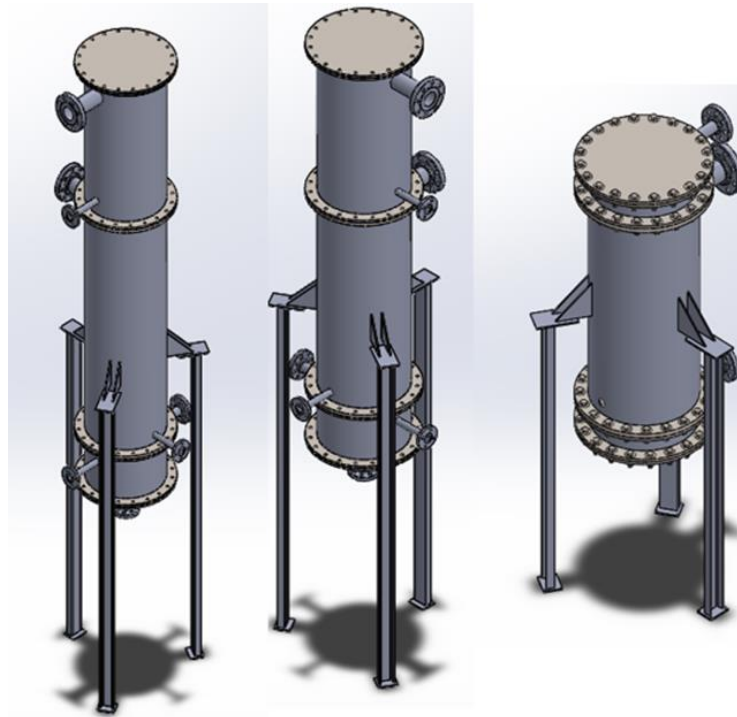
Tabla 19. Equipos necesarios para el funcionamiento del sistema.

NUMERACIÓN	SISTEMA
1	Evaporador-condensador primer efecto
2	Evaporador-condensador segundo efecto
3	Condensador enfriado por agua
4	Tanque de condensado 1
5	Tanque de condensado 2
6	Isotank de alimentación
7	Tubería de conexión

5.1 EVAPORADORES – CONDENSADORES Y CONDENSADOR ENFRIADO POR AGUA.

5.1.1 Modelo CAD de los evaporadores –condensadores y el condensador enfriado por agua. Se parte de los modelos CAD modelados anteriormente (ver figura 28), para cada uno de los intercambiadores de calor del sistema global, y con base a ellos se inició el proceso de construcción de los equipos.

Figura 28. Modelo CAD, evaporadores condensadores y condensador enfriado por agua.



5.1.2 Materiales de construcción. Se procedió a conseguir los materiales necesarios para la fabricación de corazas, tubos, cabezales, bridas de unión, empaques de sellos y perfiles estructurales de soporte para los equipos.

Tabla 20. Materiales usados para construcción de Evaporadores y Condensador.

Material	cantidad
TUBO INOX 304L 1" SCH 40 C/COSTURA	27
TUBO INOX 304L 18" SCH 40 S/COSTURA	1
BRIDAS INTERCAMBIADORES 18"* 1/8 ESPESOR	12
TAPAS INTERCAMBIADORES 18" *1/8 ESPESOR	4
PLACA TUBOS INTERCAMBIADORES 18" *1/2 ESPESOR	6
PERFIL C 3" HR	3

Figura 29. Materiales usados para construcción de Evaporadores y Condensador.



5.1.3 Corte y ensamblaje de equipos. Teniendo los materiales necesarios disponibles se realizó el corte de los tubos requeridos para cada equipo, se cortó el tubo de 18" según la longitud requerida para cada tramo de los cascos y los cabezales y se puntearon los equipos para su posterior proceso de soldadura.

Figura 30. Corte y ensamblaje de Evaporadores y Condensador.



5.1.4 Proceso de soldadura de equipos y bridas de unión. Posteriormente se realizó el proceso de soldadura de todos los equipos usando soldadura tipo TIG con argón para acero inoxidable con ayuda del equipo de mantenimiento refrigerado de Avides Mac Pollo S.A., se adquirieron los materiales necesarios para las entradas y salidas de los cabezales y se conectaron a agujeros hechos mediante corte de plasma.

Tabla 21. Materiales usados para bridas de unión.

Material	cantidad
TUBO INOX 304L 1" SCH 40 C/COSTURA	1
TUBO INOX 304L 1 1/2" SCH 40 S/COSTURA	1
TUBO INOX 304L 3" SCH 40 S/COSTURA	1
CONJUNTO BRIDA, EMPAQUE, TORNILLO 1" SW 300 LBS inox	14
CONJUNTO BRIDA, EMPAQUE, TORNILLO 1 1/2" SW 300 LBS inox	12
CONJUNTO BRIDA, EMPAQUE, TORNILLO 3" SW 300 LBS inox	10

Figura 31. Proceso de soldadura de equipos y bridas de unión.



5.1.5 Pruebas de hermeticidad para Cascos de los equipos. Estando el proceso de soldadura de los equipos terminado se probó la hermeticidad de los cascos de los equipos mediante aire comprimido a 150 [psig] y agua-jabón con el fin de detectar y corregir las posibles fugas en los cordones de soldadura.

Figura 32. Pruebas de hermeticidad para cascos de los equipos.



5.1.6 Instalación de soportes y ubicación en sitio. Se instalaron los perfiles de soporte de los equipos mediante soldadura SMAW tipo bimetálica y con ayuda de un diferencial se ubicaron en sitio en la planta de harinas de Avidesa Mac Pollo S.A. Además, se realizó la solicitud de compra correspondiente a la tornillería de las bridas de los equipos.

Tabla 22. Materiales usados para tornillería de equipos.

Material	cantidad
TORNILLO INOX HEXAGONAL 1/2" X 3-1/2" RC, TUERCA, GUASA, ARANDELA	28
TORNILLO INOX HEXAGONAL 1/2" X 3" RC, TUERCA, GUASA, ARANDELA	240
TORNILLO INOX HEXAGONAL 3/4" X 4-1/2" RC, TUERCA, GUASA, ARANDELA	40
TORNILLO INOX HEXAGONAL 3/4" X 4" RC, TUERCA GUASA, ARANDELA	24

Figura 33. *Instalación de soportes.*



Figura 34. *Ubicación de equipos en sitio.*



5.2 TANQUES DE CONDENSADOS.

Se parte de los modelos CAD modelados anteriormente (ver figura 35), para cada uno de los tanques de condensado, y con base a ellos se inició el proceso de construcción de los equipos.

Figura 35. Modelo CAD tanques de condensado.



Se solicitaron los materiales necesarios para la construcción de los tanques de condensado, se realizaron los procesos de soldadura TIG para las tapas y las mirillas de nivel y de soldadura SMAW bimetálica para los soportes de los tanques, finalmente se ubicaron en sitio.

Tabla 23. Materiales usados para tanques de condensado.

Material	cantidad
LAMINA INOX 3/4 4*2M	1
PERFIL C 3" HR	1
TAPAS TANQUES DE CONDENSADO 16" (USO DE LA LAMINA DE 3/4")	2
BASES PERFILES DE SOPORTE (USO DE LA LAMINA DE 3/4")	6
JUEGO DE VALVULAS Y MIRILLAS DE NIVEL VISUAL	2
ACCESORIOS INSTALACION MIRILLAS	12

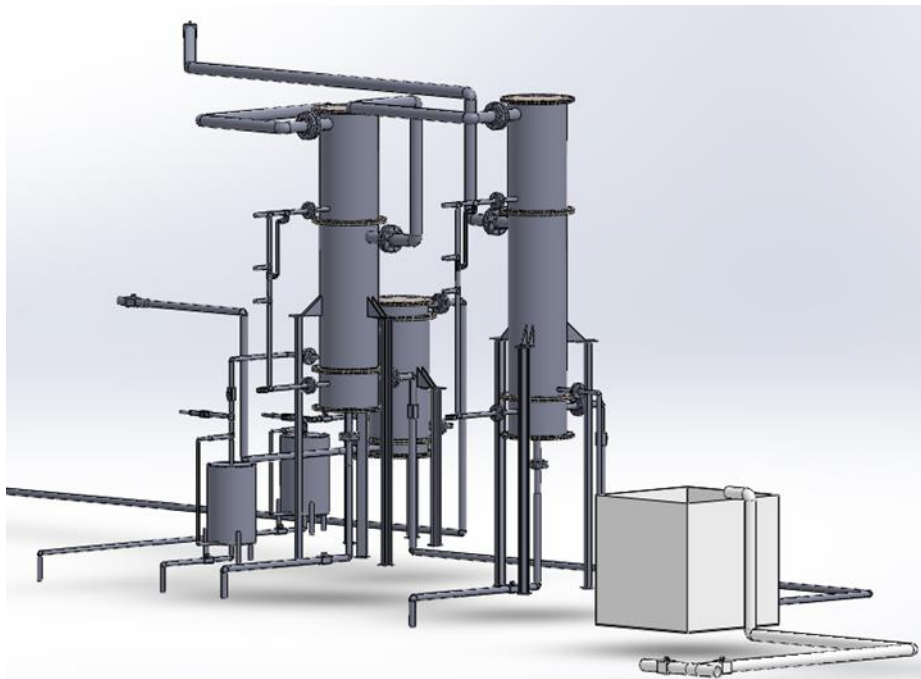
Figura 36. Ubicación de tanques de condensado en sitio.



5.3 CONEXIÓN ENTRE EQUIPOS.

5.3.2 Modelo CAD del sistema total ensamblado. Se parte de los modelos CAD modelados anteriormente (ver figura 37), para el sistema total ensamblado con su respectiva tubería de conexión y se inició el proceso de conexión de los equipos.

Figura 37. Modelo CAD del sistema total ensamblado.



5.3.2 Conexión vapor residual. Mediante tubería de acero inoxidable de 3" se realizó la derivación del vapor residual proveniente de los cooker de vísceras hacia el casco del primer evaporador, esta derivación de vapor es usada como fuente de energía del sistema.

Tabla 24. Materiales usados para la conexión del vapor residual.

Material	cantidad
VALVULA DE BOLA 3" INOX 300 PSI RC	1
CONJUNTO BRIDA, EMPAQUE, TORNILLO 3" SLIP ON 150 LBS inox	4
CODO 3" INOX SCH 40 SW	5

Figura 38. Conexión del vapor residual.



5.3.3 Conexión primer y segundo evaporador. Mediante tubería de acero inoxidable de 3" se realizó la conexión entre el vapor producido en el primer evaporador y el casco del segundo evaporador.

Tabla 25. Materiales usados para la conexión entre evaporadores.

Material	cantidad
CONJUNTO BRIDA, EMPAQUE, TORNILLO 3" SLIP ON 150 LBS inox	2
CODO 3" INOX SCH 40 SW	4

Figura 39. Conexión primer y segundo Evaporador.



5.3.4 Conexión segundo evaporador y condensador. Mediante tubería de acero inoxidable de 3" se realizó la conexión entre el vapor producido en el segundo evaporador y el condensador.

Tabla 26. Materiales usados para la conexión entre el segundo evaporador y el condensador.

Material	cantidad
CONJUNTO BRIDA, EMPAQUE, TORNILLO 3" SLIP ON 150 LBS inox	2
CODO 3" INOX SCH 40 SW	4

Figura 40. Conexión segundo evaporador y condensador



5.3.5 Conexión Agua a destilar. Mediante tubería de acero inoxidable de 1 1/2" se realizó la conexión del agua a destilar la cual se deriva en paralelo a cada evaporador.

Tabla 27. Materiales usados para la conexión del agua a destilar.

Material	cantidad
VALVULA DE BOLA INOX 1 1/2" 300 PSI RC	2
CONJUNTO BRIDA, EMPAQUE, TORNILLO 1 1/2" SLIP ON 150 LBS inox	6
CODO 1 1/2" INOX SCH 40 SW	8
TEE 1 1/2" INOX SCH 40 SW	1
TANQUE IBC 1000 LITROS	1

Figura 41. Conexión del agua a destilar.



5.3.6 Conexión agua fría torre a condensador. Mediante tubería de acero inoxidable de 1 1/2" se realizó la conexión entre el agua fría proveniente de la torre de enfriamiento y el condensador.

Tabla 28. Materiales usados para la conexión de agua fría entre torre y condensador.

Material	cantidad
CONJUNTO BRIDA, EMPAQUE, TORNILLO 1 1/2" SLIP ON 150 LBS inox	2
CODO 1 1/2" INOX SCH 40 SW	5

Figura 42. Conexión entre torre y condensador (agua fría).



5.3.7 Conexión agua caliente torre a condensador. Mediante manguera reforzada de 1 1/2" se realizó la conexión entre el agua fría proveniente del condensador hacia la torre de enfriamiento.

Tabla 29. Materiales usados para la conexión de agua caliente entre torre y condensador.

Material	cantidad
CONJUNTO MANGUERA REFORZADA 1 1/2"	1
TERMOMETRO BIMETALICO	1

Figura 43. Conexión entre torre y condensador (agua caliente).



5.3.8 Purgas evaporadores. Mediante tubería de acero inoxidable de 1 1/2" se realizó la purga de cada evaporador usando una válvula de bola para cada evaporador.

Tabla 30. Materiales usados para la purga de los evaporadores.

Material	cantidad
CONJUNTO BRIDA, EMPAQUE, TORNILLO 1 1/2" SLIP ON 150 LBS inox	2
VALVULA DE BOLA INOX 1 1/2" 300 PSI RC	2

Figura 44. Purga de los evaporadores.



5.3.9 Instrumentación. Finalmente se instalaron los indicadores de presión, temperatura y nivel de agua en cada evaporador además de los electrodos de nivel necesarios para el control automático.

Tabla 31. Materiales usados para la instrumentalización de los evaporadores

Material	cantidad
VACUOMETRO -30 PSIG	2
NIPLE 1 1/2" INOX SCH 40 ROSCADO A UN LADO	6
TEE 1 1/2" INOX SCH 40 SW	12
ELECTRODOS CAPACITIVOS PARA NIVEL DE LIQUIDO	6
MIRILLAS DE NIVEL DE LIQUIDO	2
ACCESORIOS INSTALACION MIRILLAS DE NIVEL	12
TERMOMETRO BIMETALICO 150°C	2

Figura 45. Instrumentalización de los evaporadores.



6. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

Finalizado el proceso de construcción se realizaron las pruebas de funcionamiento del sistema total con el fin de identificar los diversos factores que afectan el comportamiento de la producción de vapor en ambos efectos y su respuesta ante las condiciones de operación variable que se presentan gracias a el flujo de vapor residual el cual no es constante y depende de la cantidad de carga de subproducto de pollos presente en el instante de tiempo.

Para tal fin, se plantearon dos tipos de pruebas generales, la primera empleando agua limpia sin ningún agente contaminante relacionado con los subproductos de beneficio de pollos y la segunda utilizando el agua residual (Afluente de la PTAR), la cual, a pesar de ya poseer un tratamiento, aún no cumplía los estándares de la norma colombiana como se especificó anteriormente.

Los parámetros analizados durante las pruebas que describen el comportamiento del sistema y su respuesta ante variaciones de operación se muestran en la tabla 32.

Tabla 32. Parámetros analizados en las pruebas de funcionamiento.

EQUIPO	PARAMETRO
Evaporador primer efecto	Presión absoluta
	Temperatura
	Destilado
Evaporador segundo efecto	Presión absoluta
	Temperatura
	Destilado
Cookers de víscera	Vapor residual disponible

6.1 PRUEBA CON AGUA LIMPIA

6.1.1 Condiciones de prueba con agua limpia.

- Tipo de agua: Agua potable.
- Nivel inicial evaporadores: 60 L.
- Temperatura de ingreso: 26 °C.

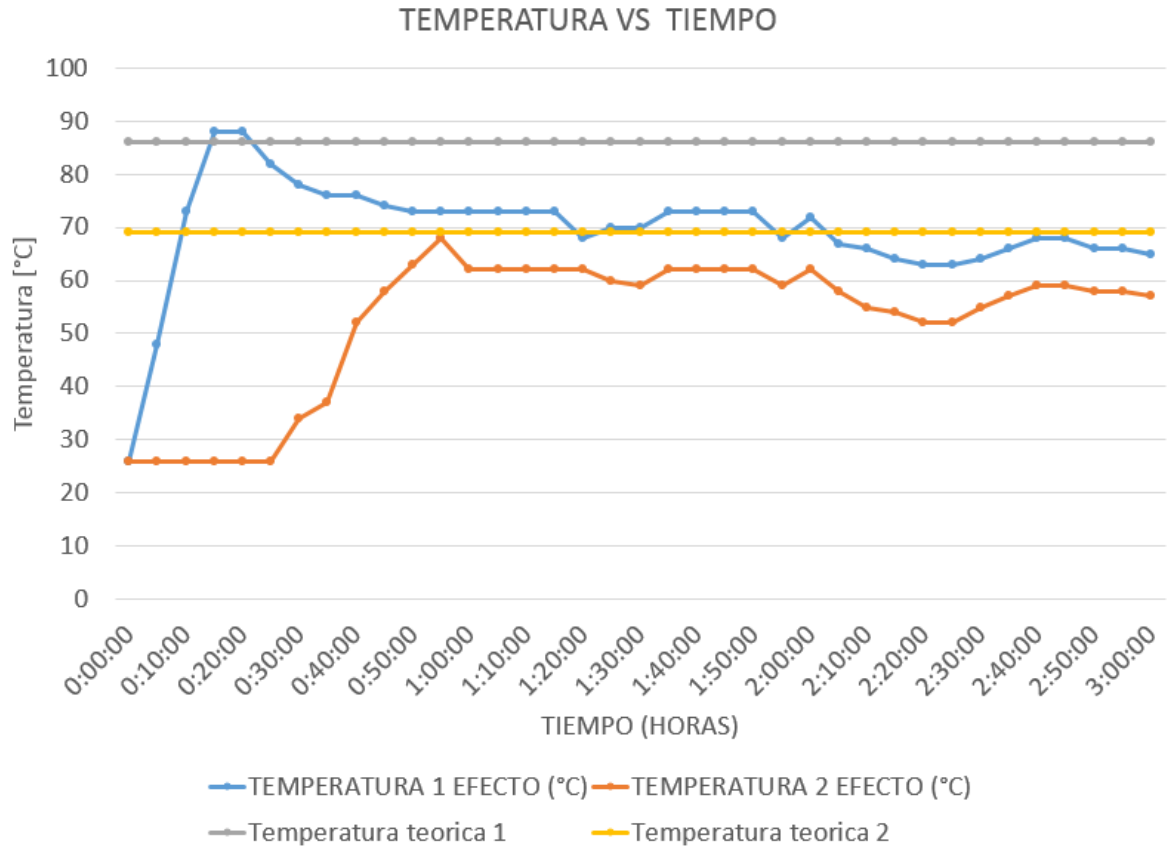
- Duración prueba: 3 horas.
- Reposición de vacío en ambos efectos.
- Restitución de nivel de agua en ambos efectos.
- Toma de datos cada 5 minutos.

6.1.2 Procedimiento de prueba con agua limpia.

- Se cierran las válvulas necesarias para garantizar la hermeticidad del sistema.
- Se conecta la bomba de vacío al primer efecto y se realiza el vacío inicial hasta 60 Kpa de presión absoluta.
- Se conecta la bomba de vacío al segundo efecto y se realiza el vacío inicial hasta 30 Kpa de presión absoluta.
- Se realiza el ingreso de agua a ambos efectos aprovechando la diferencia de presiones entre el tanque de alimentación y los tubos de los efectos hasta apreciar que la mirilla visual se vea llena.
- Se abre la válvula de vapor residual para comenzar el proceso de transferencia de calor.

6.1.3 Resultados prueba con agua limpia. Después de realizada la prueba con agua limpia se pudo determinar el comportamiento de las variables a analizar y encontrar los detalles a mejorar para la ejecución de la prueba con agua residual. Al observar la figura 46 se ve que el estado transitorio del sistema completo dura alrededor de una hora, esto debido a que primero se deben calentar las paredes de los equipos que inicialmente se encuentran a temperatura ambiente, además, se debe calentar el volumen de agua presente en el interior de los tubos de cada evaporador (efectos) hasta alcanzar su respectiva temperatura de saturación, adicionalmente, se aprecia que el calentamiento del segundo efecto tarda más tiempo ya que este tiene como fuente de energía el vapor que se produce en el primer efecto por lo tanto hasta que no exista producción en el primer efecto el segundo no ganará temperatura.

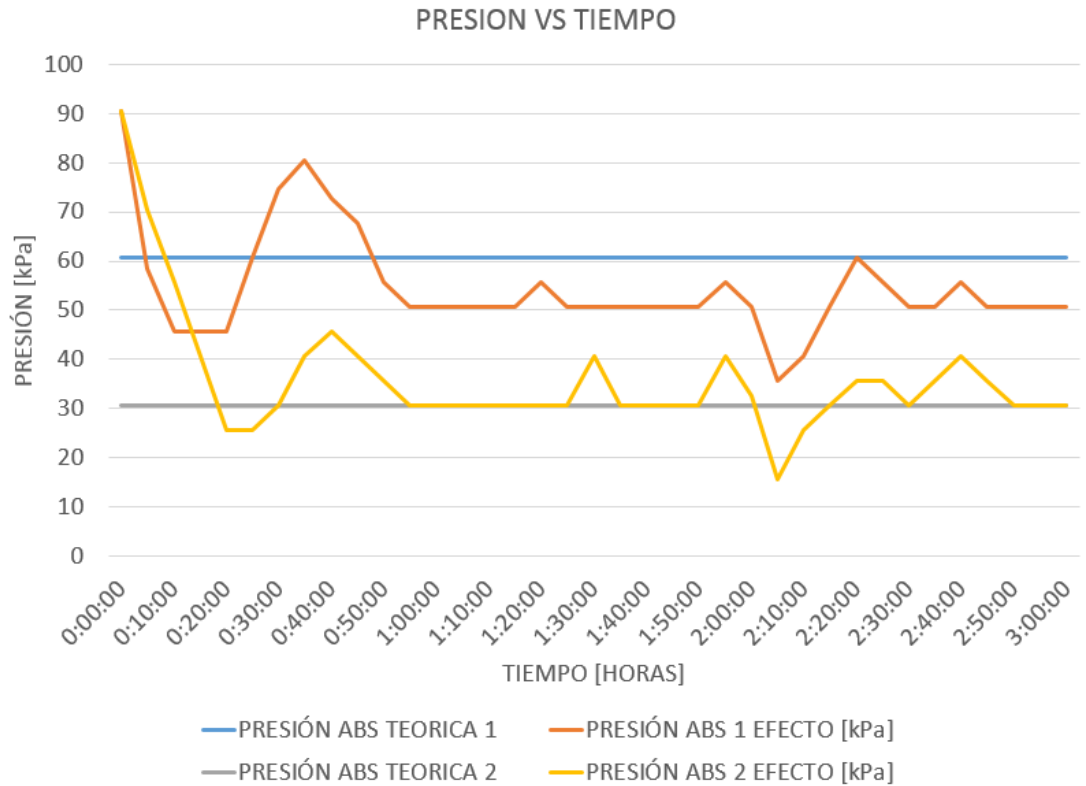
Figura 46. Evolución de Temperatura vs tiempo para ambos efectos con agua limpia.



El comportamiento de la temperatura de ambos efectos a partir de su operación cuasi estable tiende a permanecer constante siempre y cuando la presión absoluta se mantenga y la reposición de nivel no se realice muy rápido, al observar la figura 47 se puede apreciar que en el estado transitorio del sistema la presión absoluta aumenta en ambos efectos esto debido al calentamiento del segundo efecto mencionado anteriormente, ya que al alcanzar la temperatura de saturación del primer efecto el vapor producido no se condensa del todo con solo calentar el volumen de agua en el segundo efecto, situación que se repite cuando el vapor producido en el segundo efecto comienza a calentar los tubos y el agua de enfriamiento en el condensador. La presión absoluta también aumenta cada vez que se realiza reposición de agua de alimentación al igual que sucedió con la temperatura, debido a que el volumen almacenado en los intercambiadores

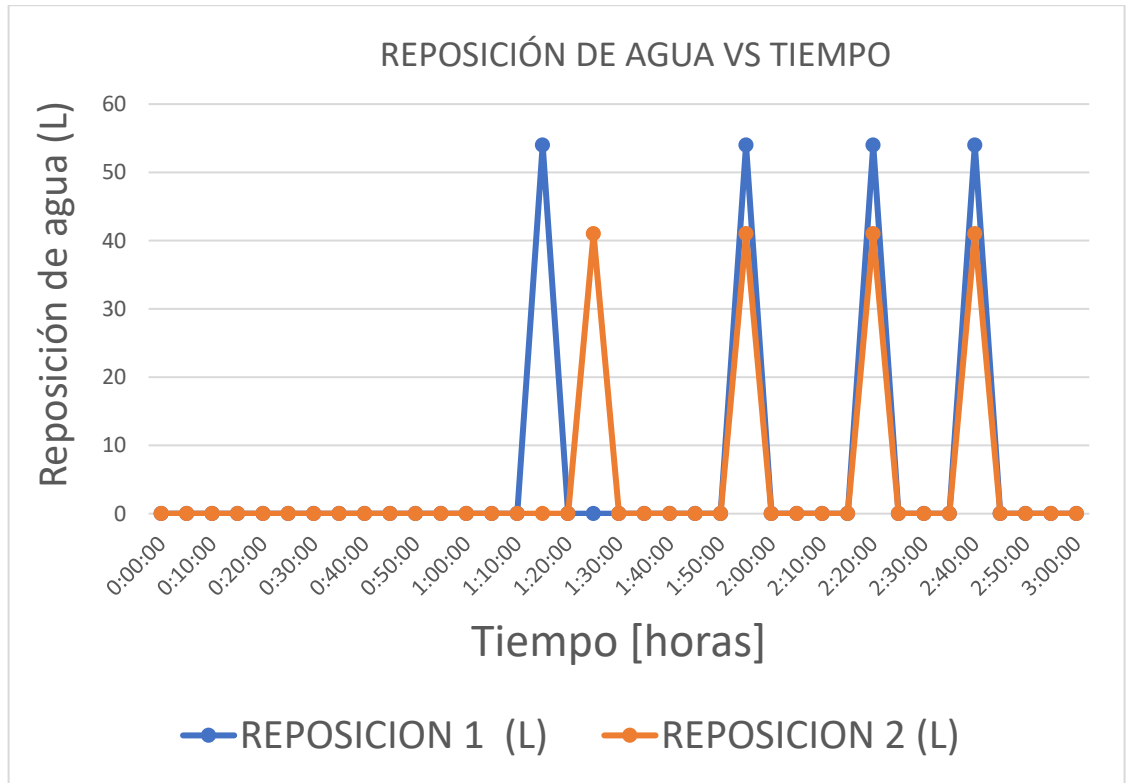
aumenta (ver figura 47), la reposición de la presión de vacío de cada efecto se realizó cuando sus temperaturas no presentaban grandes fluctuaciones.

Figura 47. Evolución de la presión de vacío vs tiempo para ambos efectos con agua limpia.



La figura 48 muestra la cantidad de reposiciones de nivel y el volumen en litros de cada una de las reposiciones efectuadas, se comprobó mediante esta prueba preliminar que las mirillas instaladas no son del todo confiables ya que el nivel visual que indican no corresponde al nivel real dentro de los equipos situación que facilita el arrastre de líquido entre efectos, la solución que se dio a este problema fue la implementación de un control de nivel mediante electrodos capacitivos y válvulas solenoide las cuales permitían realizar la reposición de agua de alimentación.

Figura 48. Reposición de agua vs tiempo para ambos efectos con agua limpia.



La figura 49 muestra el comportamiento de la producción de destilado en litros respecto del paso del tiempo, se puede apreciar que como era de esperarse el condensado producto del vapor residual es mayor al destilado producido por el primer efecto dado que al tener una mayor temperatura este condensado posee una entalpia de cambio de fase menor a la entalpia correspondiente al destilado de la primera etapa que se encuentra a menor temperatura, como se puede ver en la figura 50, de igual manera ocurre lo anteriormente mencionado entre el destilado del primer efecto y el destilado del segundo efecto.

Figura 49. Destilado total vs tiempo con agua limpia.

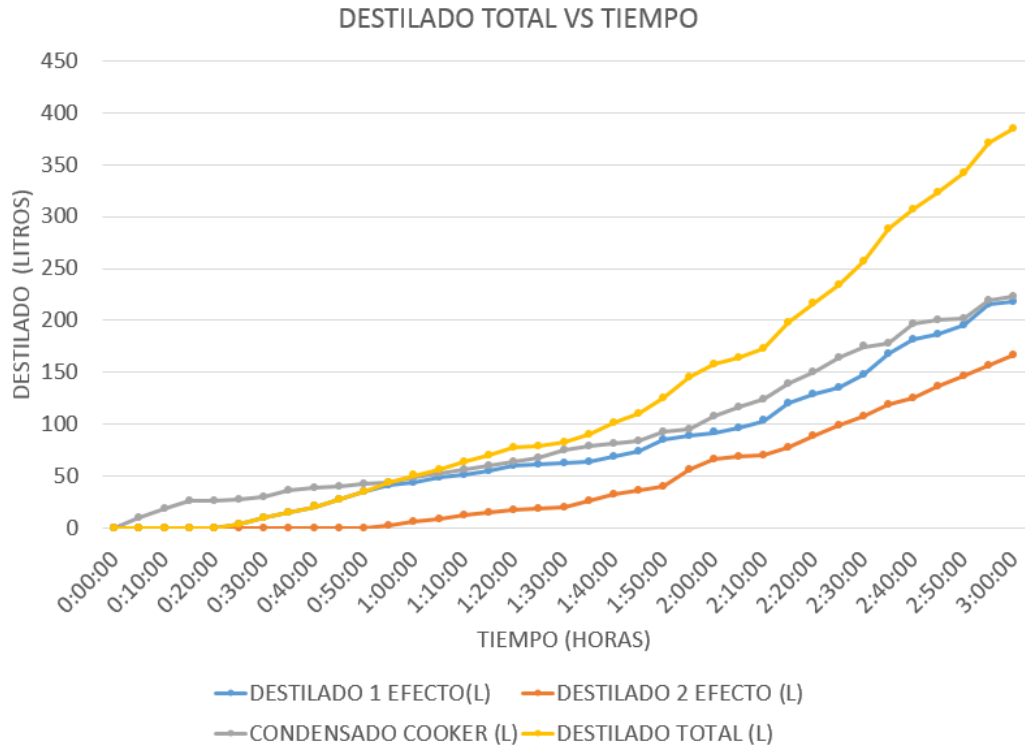
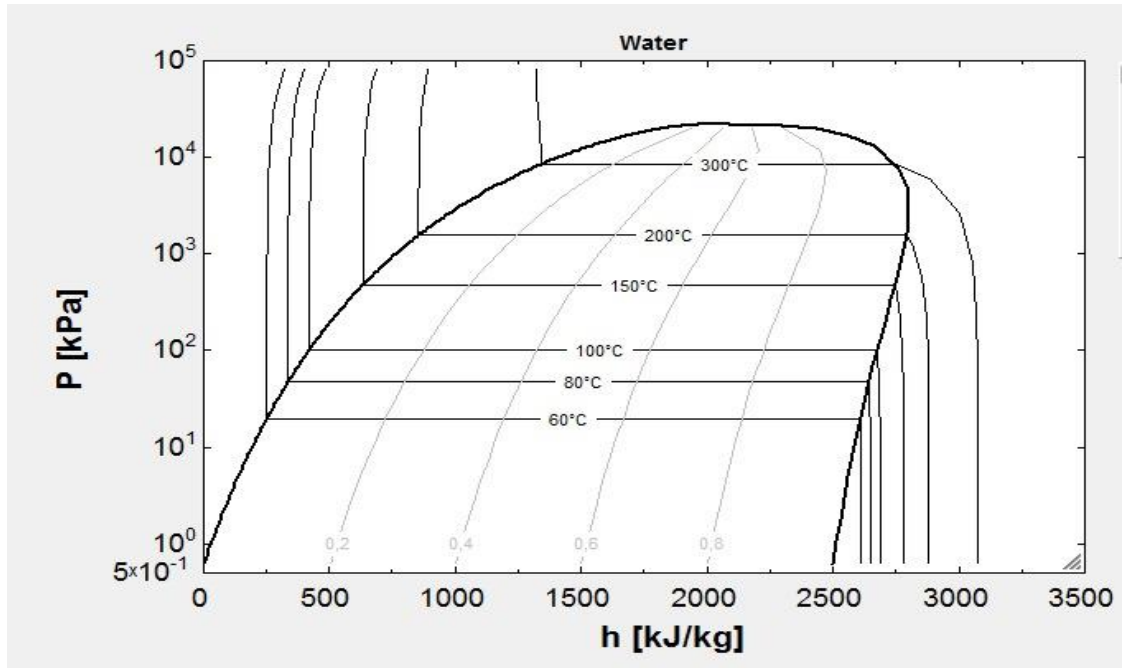
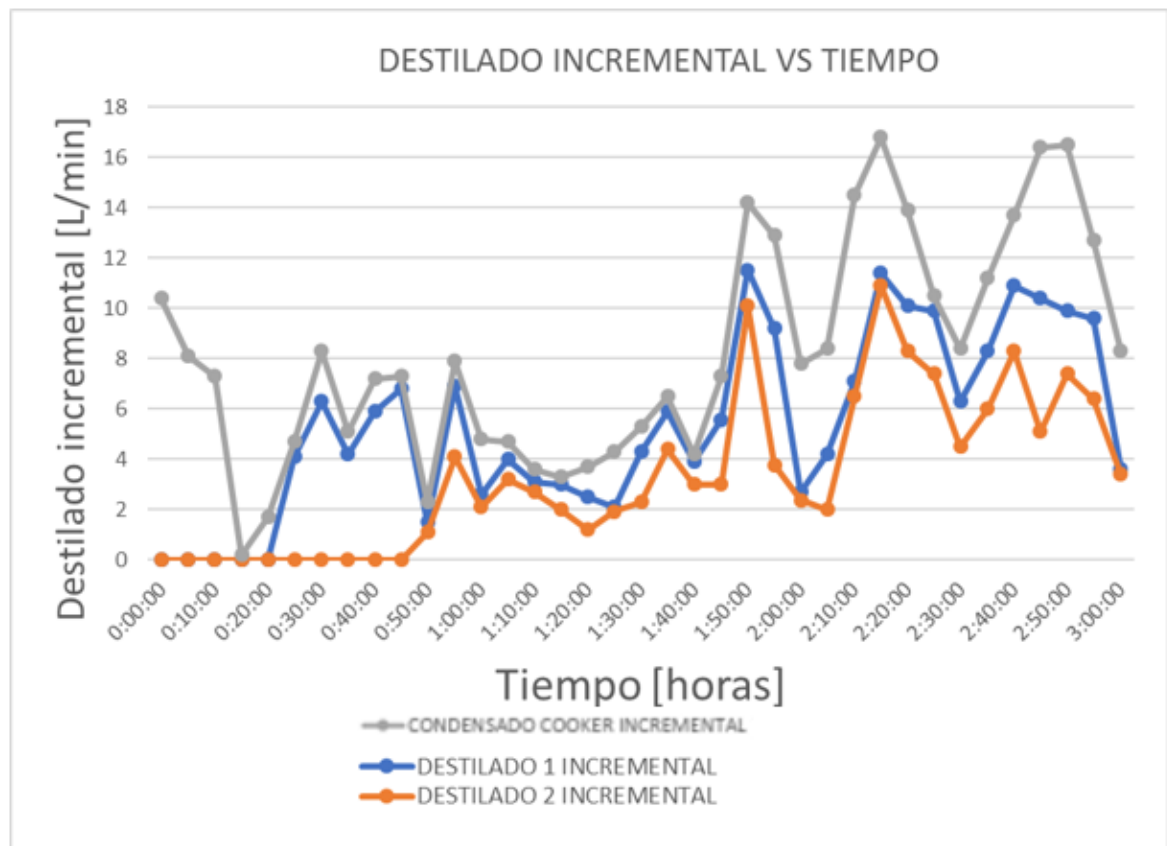


Figura 50. Diagrama p-h para el agua.



Finalmente, la figura 51 muestra el comportamiento variable del vapor residual disponible como fuente de energía condicionando al sistema a funcionar bajo un régimen de producción variable que es totalmente dependiente de la carga presente en los cookers como se mencionó anteriormente, sin embargo, a pesar de la condición del vapor de proceso se observa que de forma incremental se cumple también que la producción individual de destilado de los efectos es inferior al condensado del cooker, se planteó a partir de lo observado en la figura 51 monitorear el caudal de condensado residual disponible con el fin de observar sus fluctuaciones.

Figura 51. Destilado incremental vs tiempo con agua limpia



Los resultados globales y el beneficio que representa el sistema de evaporación por doble efecto en comparación al condensado total de cooker se muestra a continuación:

Tabla 33. Resultados globales para prueba con agua limpia.

AGUA LIMPIA	3 horas prueba
PROMEDIO L/hora	LITROS/HORA
DESTILADO 1 EFECTO	84,1
DESTILADO 2 EFECTO	72,3
TOTAL DE EFECTOS (1+2)	156,3
CONDENSADO COOKER	92,7
BENEFICIO (total/cooker)	1,7

6.2 PRUEBA CON EFLUENTE DE LA PTAR

6.2.1 Condiciones de prueba con efluente de la PTAR.

- Tipo de agua: Efluente de la PTAR.
- Nivel inicial evaporadores: 60 L.
- Temperatura de ingreso: 30°C
- Duración prueba: 6,5 horas.
- Reposición de vacío en ambos efectos.
- Restitución de nivel de agua en ambos efectos.
- Toma de datos cada 5 minutos.
- Toma de muestras de destilado cada hora.

6.2.2 Procedimiento de prueba con efluente de la PTAR.

- Se cierran las válvulas necesarias para garantizar la hermeticidad del sistema.
- Se conecta la bomba de vacío al primer efecto y se realiza el vacío inicial hasta una presión absoluta de 50 Kpa, con el fin de reducir el tiempo de reposición de vacío en el estado transitorio.
- Se conecta la bomba de vacío al segundo efecto y se realiza el vacío inicial hasta una presión absoluta de 18 Kpa, con el fin de reducir el tiempo de reposición de vacío en el estado transitorio.

- Se realiza el ingreso de agua a ambos efectos aprovechando la diferencia de presiones entre el tanque de alimentación y los tubos de los efectos. El sistema de control se encarga de abrir y cerrar las válvulas solenoides en función del nivel de cada uno de los efectos.
- Se abre la válvula de vapor residual para comenzar el proceso de transferencia de calor.

Antes de realizar la prueba con el efluente se implementó el control de nivel en cada uno de los efectos y se comprobó cual era el verdadero nivel en la mirilla que correspondía al nivel máximo de agua de alimentación permitido, a continuación, se muestran los cambios realizados.

Figura 52. Controlador de nivel.



Después de realizada la prueba con el efluente de la PTAR se pudo determinar el comportamiento real del sistema y se obtuvieron las muestras del destilado el cual fue llevado a laboratorio para su posterior análisis de contaminantes.

Al observar las figuras 53 y 54 se aprecia que el funcionamiento inicial en estado transitorio del sistema es equivalente al funcionamiento cuando se usó agua limpia, es decir el tiempo de calentamiento se mantuvo en aproximadamente una hora para el sistema completo. Se puede observar como las temperaturas presentan variaciones debido a la reposición del nivel de los evaporadores (efectos), las cuales fueron más comunes ya que el control de nivel garantizaba que este fuera el correcto, evitando que el nivel superara el deseado y se presentara arrastre de líquido, la temperatura también se vio afectada debido a las purgas de los tanques de condensado, las cuales se realizaron cada hora y tenían como objetivo recolectar muestras de destilado para su posterior análisis. También se puede adicionar que cada vez que se hace reposición la temperatura aumenta, esto se debe a que no hay fluido saliendo en la red (debido a que se acumula en los tanques de condensados para evitar perder el vacío) sino solo hay ingreso lo que ocasiona que el sistema se presione debido a que hay aumento de volumen líquido.

Figura 53. Evolución de Temperatura vs tiempo del primer efecto sujeto a reposiciones de nivel con el efluente de la PTAR.

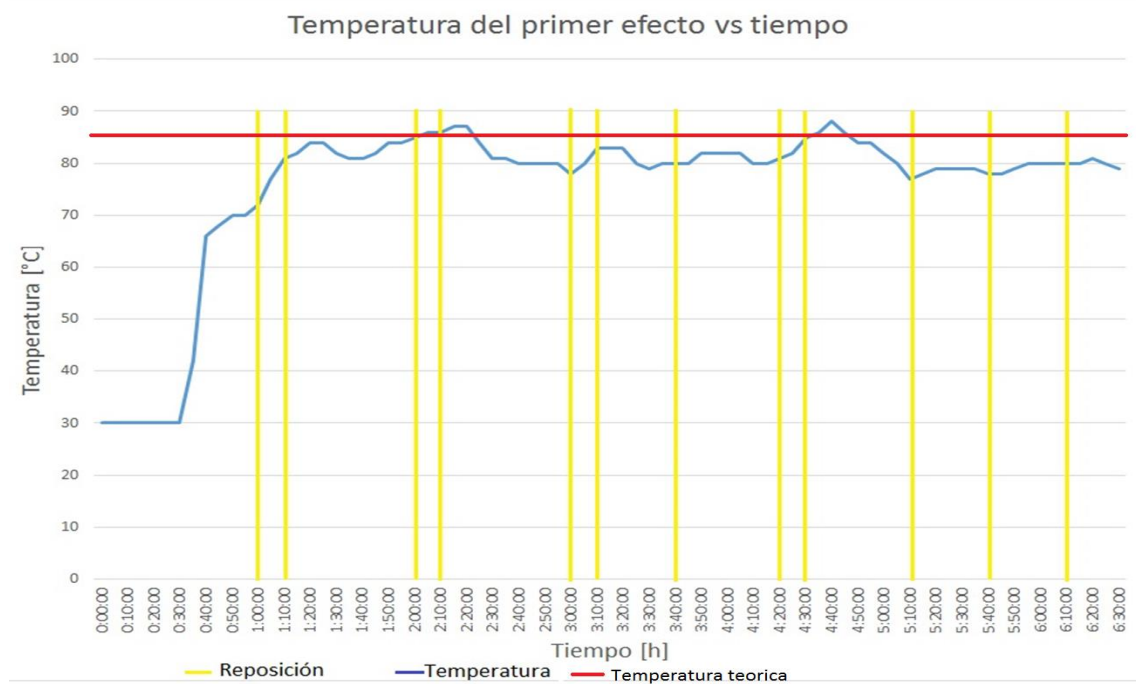
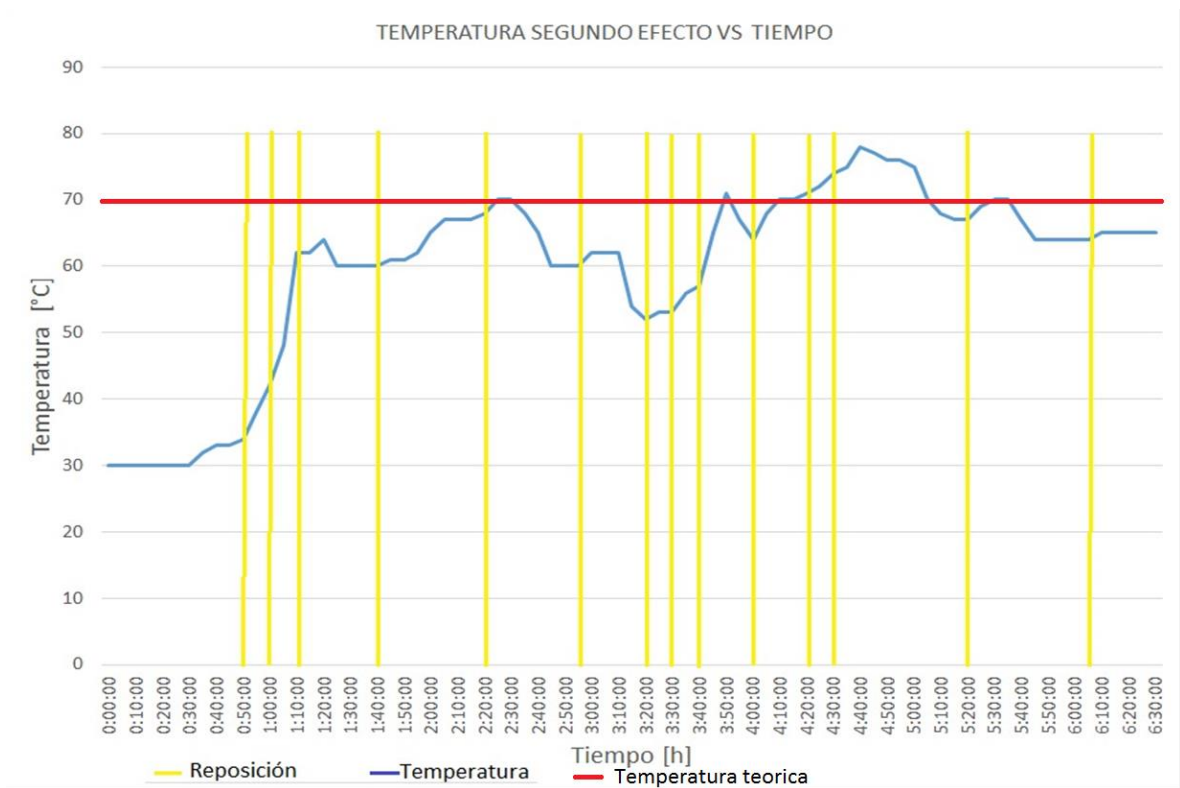


Figura 54. Evolución de Temperatura vs tiempo del segundo efecto sujeto a reposiciones de nivel con el efluente de la PTAR



Las figuras 55 y 56 muestran como al iniciar la prueba se realizó un vacío semejante en cada efecto con el fin de evitar tener que reponer vacío cuando se realice el ingreso de agua y la producción de vapor (hay mayor volumen por lo tanto el sistema tiende a presurizarse), con esto la presión de vacío tendió a estabilizarse en ambos efectos. La reposición de vacío se realizó únicamente en los tanques de condensados cada vez que se tomaron las respectivas muestras de destilado, sin embargo, cuando se tomaron las muestras se debía cerrar la válvula que unía el condensador con el tanque de condensados ocasionando que estos se acumularan en el condensador disminuyendo el área efectiva generando así un aumento de la presión absoluta, cabe resaltar que al abrir el paso hacia los tanques de condensados nuevamente el sistema recuperaba el vacío al que se encontraba trabajando en cada uno de los efectos.

Figura 55. Evolución de presión absoluta y temperatura vs tiempo para el segundo efecto con el efluente de la PTAR.

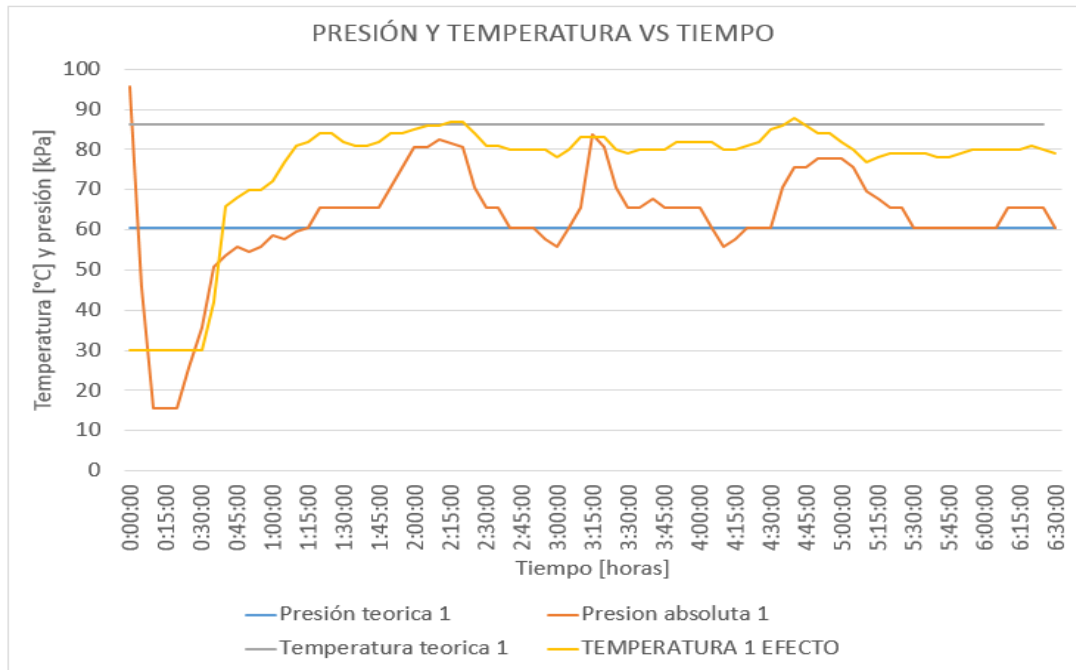
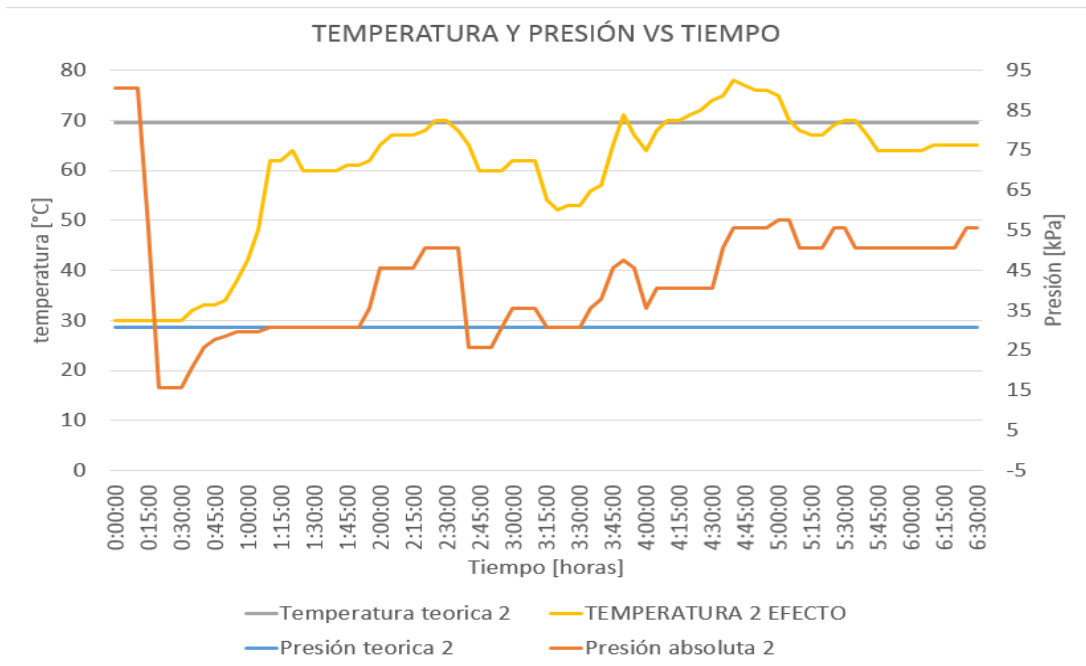
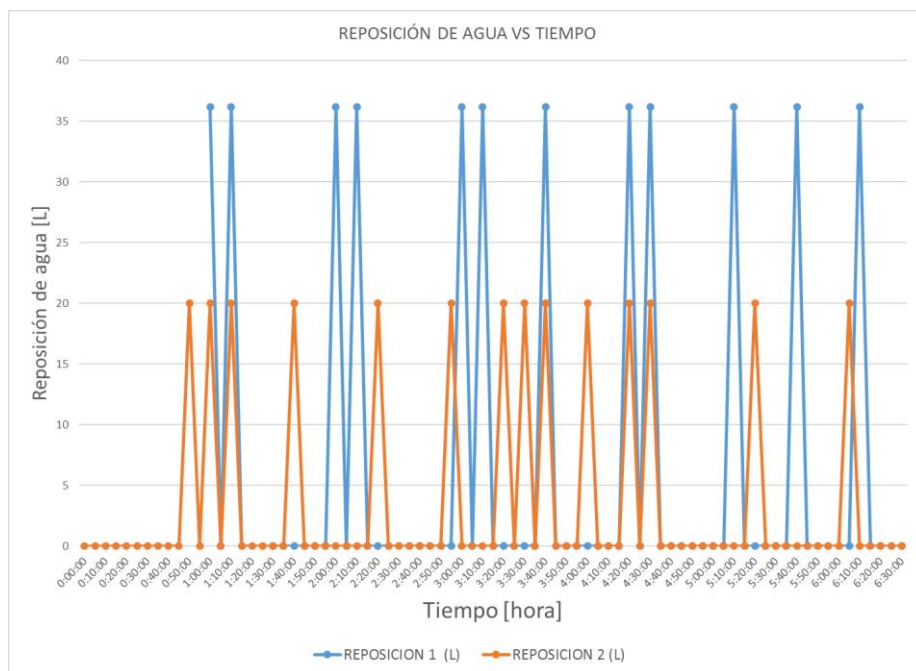


Figura 56. Evolución de presión absoluta y temperatura vs tiempo para el segundo efecto con el efluente de la PTAR.



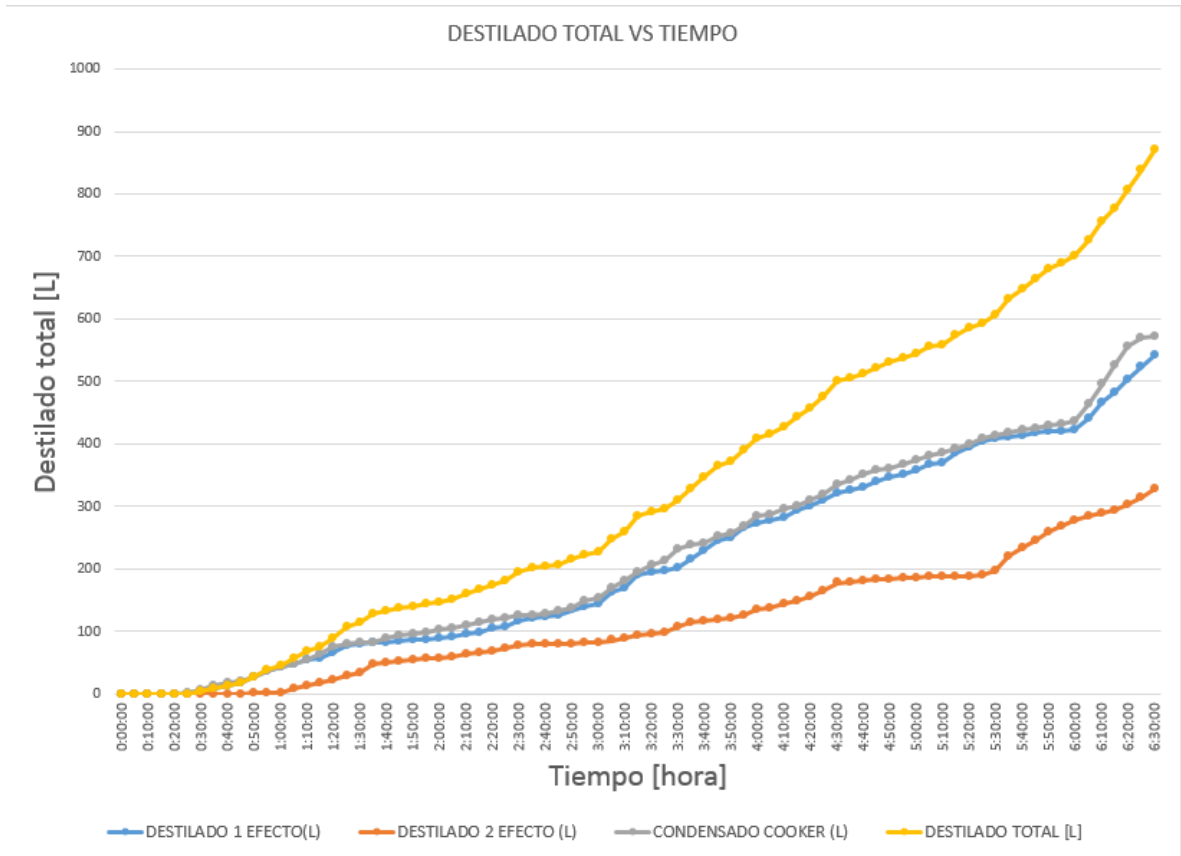
Al analizar la figura 57 se observa el efecto que tuvo la implementación del control de nivel en el sistema, Inicialmente la reposición se basó en las mirillas de nivel pero al implementar el control se comprobó que las mirillas proporcionaban un nivel falso que correspondía a una altura mucho mayor a la máxima permitida, por lo tanto, el volumen ingresado por cada reposición era mucho mayor al necesario y existía la posibilidad de generar arrastre de líquido, el control de nivel garantizó el nivel adecuado dentro de cada sistema el cual lógicamente debía ser menor en comparación a la prueba realizada con agua limpia y por tanto se necesitó realizar más reposiciones a lo largo de la prueba.

Figura. 57. Reposición de nivel vs tiempo para ambos efectos con el efluente de la PTAR.



La figura 58 muestra la producción de destilado a lo largo de la prueba, como es de esperar el condensado producto del vapor residual de cooker es mayor que el destilado del primer efecto y este a su vez es mayor que el destilado del segundo efecto, sin embargo, la suma de ambos destilados totales es mayor que el condensado de cooker, teniendo así el beneficio del sistema en dos efectos.

Figura. 58. Destilado total vs tiempo para ambos efectos con el efluente de la PTAR.



La figura 59 muestra la producción incremental del destilado en ambos efectos en comparación al condensado de cooker, al igual que en la prueba con agua limpia se observa la dependencia de la producción con el vapor residual disponible, analizando la figura 60 la cual corresponde al caudal de condensado de cooker se observa que al ser este muy variable en el tiempo en los intervalos donde el caudal disponible fue grande la producción incremental también lo fue y del mismo modo cuando el caudal fue pobre la producción instantánea se vio reducida.

Figura 59. Destilado incremental total vs tiempo para ambos efectos con el efluente de la PTAR.

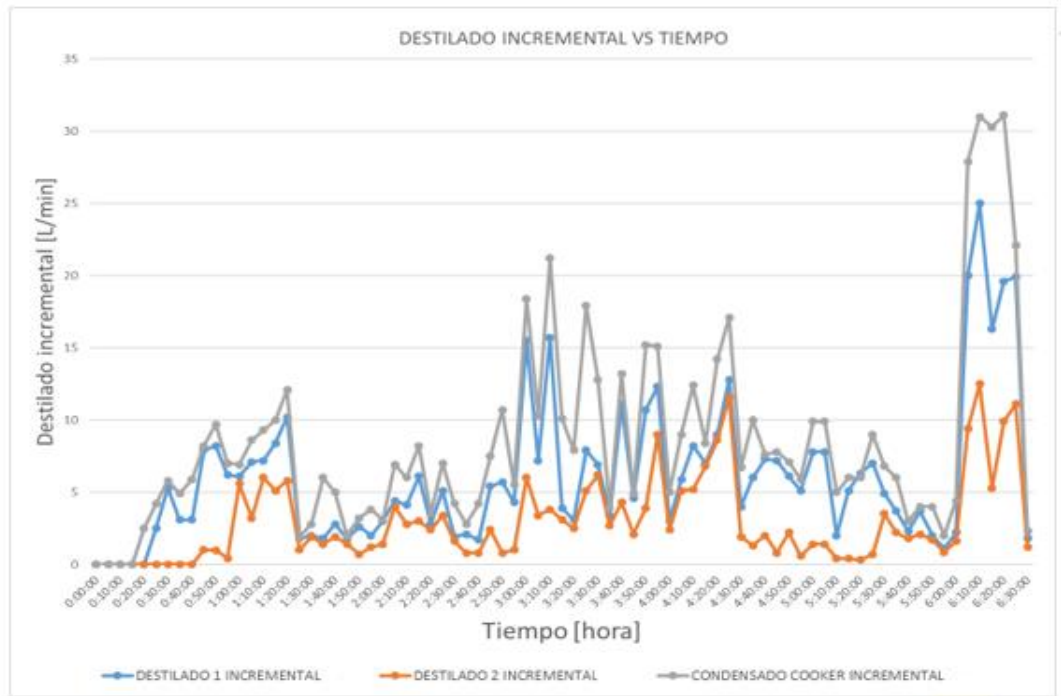
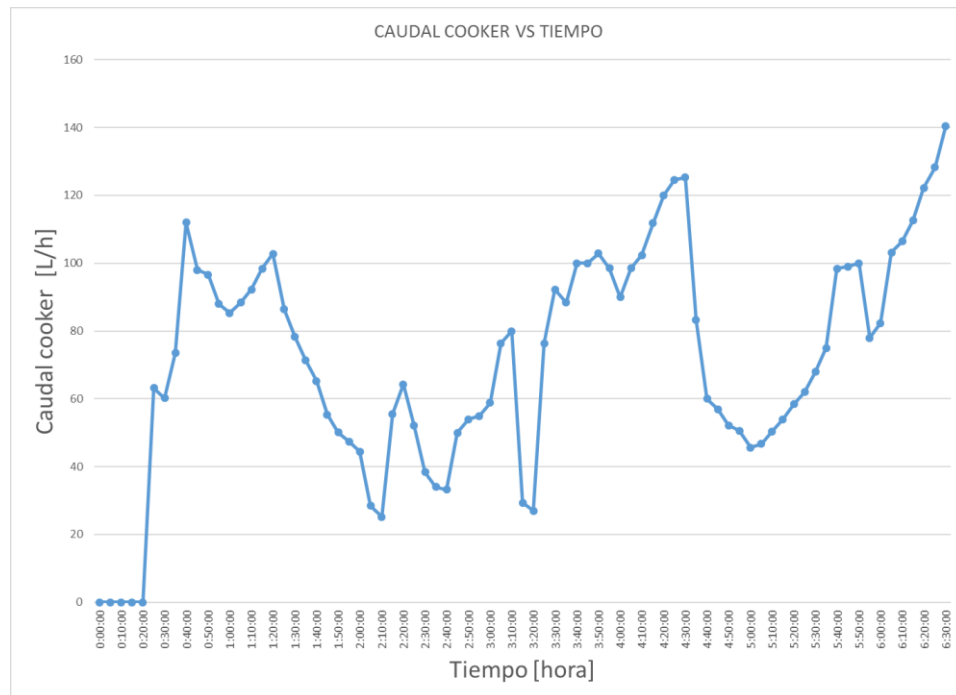


Figura 60. Caudal cooker vs tiempo para ambos efectos con el efluente de la PTAR.



Los resultados globales y el beneficio que representa el sistema de evaporación por doble efecto en comparación al condensado total de cooker se muestra a continuación:

Tabla 34. Resultados globales para prueba con el efluente de la PTAR.

EFLUENTE PTAR	6 horas prueba
PROMEDIO L/HORA	LITROS/HORA
CONDENSADO COOKER	95,3
DESTILADO 1 EFECTO	90,5
DESTILADO 2 EFECTO	58,5
TOTAL EFECTOS (1+2)	149
BENEFICIO(TOTAL/COOKER)	1,5

En comparación a la tabla de resultados globales con agua limpia se observa una reducción de los promedios de los destilados por hora de aproximadamente el 5% y una reducción del beneficio de aproximadamente el 12% sin embargo el comportamiento del sistema real en comparación al sistema teórico calculado difiera solo en un 0,8% (cabe recordar que el diseño realizado tenía como fin destilar 150 l/h).

6.3 RESULTADOS DE MUESTRAS

Finalizadas las pruebas con el afluente de la PTAR, se enviaron las muestras recolectadas a un laboratorio certificado externo a la empresa, se analizaron muestras del destilado producido a cada hora de funcionamiento por ambos efectos y del efluente de la PTAR, los análisis tenían como principal objetivo los niveles de contaminantes que actualmente no cumplen con la normativa colombiana DQO, SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST) y CLORUROS (ver tabla 35).

Tabla 35. Resultados pruebas de laboratorio para DQO, SST y CLORUROS del destilado producido.

Muestra	Hora	Cloruros	DQO	SST
Efluente PTAR	-	390	1610	47
Muestra 1 - TC1	11:40 a. m.	25	488	34
Muestra 2 - TC1	12:50 a. m.	34	580	< 25
Muestra 3 - TC1	1:30 p. m.	4	482	< 25
Muestra 4 - TC1	2:30 p. m.	< 2.5	538	< 25
Muestra 5 - TC1	3:30 p. m.	< 2.5	558	< 25
Muestra 6 - TC1	4:30 p. m.	< 2.5	975	< 25
Compuesta TC1	-	12	622	< 25
Porcentaje de disminución	-	97%	62%	>83%
Concentrado TC 1	-	1570	5345	< 25
Muestra 1 - TC2	11:40 a. m.	6	378	< 25
Muestra 2 - TC2	12:30 p. m.	< 2.5	388	< 25
Muestra 3 - TC2	1:30 p. m.	4	570	< 25
Muestra 4 - TC2	2:30 p. m.	4	610	< 25
Muestra 6 - TC2	4:30 p. m.	5	534	< 25
Compuesta TC2	-	4	560	< 25
Porcentaje de disminución	-	99%	66%	>83%
Concentrado TC 2	-	1560	5300	178

Se observa que el sistema de destilación por doble efecto cumple con su objetivo de disminuir los agentes contaminantes a niveles inferiores a los exigidos por el MADS con un porcentaje de reducción bastante eficiente, adicionalmente, los contaminantes en las muestras aumentan con el transcurso del tiempo, esto se debe a que el volumen a destilar es cada vez más concentrado (como se observa con la muestra de los concentrados tomados al final de la prueba).

En la figura 61 se observa el efluente de la PTAR, el destilado producido por el sistema y los lodos concentrados de izquierda a derecha respectivamente.

Figura 61. Efluente de la PTAR, el destilado producido por el sistema y los lodos concentrados.



6.4 COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR

El coeficiente global de transferencia de calor identifica la capacidad que tiene el sistema para transferir calor, por lo tanto, es necesario hacer un estudio comparativo del diseño versus el sistema real, para esto se utilizan los valores promedios en la prueba realizada de 6,5 horas de caudales, temperaturas y presiones (ver tabla 36), posteriormente, se calcula el coeficiente global de transferencia de calor (ver tabla 37).

Tabla 36. Datos tomados con el sistema en funcionamiento.

$P_{vacio_{IC1}}$ [Pa]	$P_{vacio_{IC2}}$ [Pa]	$V_{cond_{cooker}}$ [L/h]	$V_{cond_{IC1}}$ [L/h]	$V_{cond_{IC2}}$ [L/h]	T_{sat1} [°C]	T_{sat2} [°C]
76084	49286	95,3	90,5	58,5	92	81

Tabla 37. Coeficiente global de transferencia de calor real versus calculo.

	$U_{IC1} \left[\frac{W}{m^2 * K} \right]$	$U_{IC2} \left[\frac{W}{m^2 * K} \right]$	$U_{IC3} \left[\frac{W}{m^2 * K} \right]$
Real	1320	1250	379
Calculado	765	813	303
%Error	0,42	0,35	0,20

Como se puede observar en la tabla 37, hay una notoria mejoría del coeficiente calculado en comparación con el sistema real, debido a que se tomaron ciertas precauciones cuando se realizó el diseño del prototipo como: la resistencia térmica por incrustaciones, la temperatura del agua pura y las áreas (las cuales se aumentaron con la ubicación de los tubos en las placas portatubos, ya que con el diámetro de coraza calculado se podía colocar mayor cantidad de tubos), además, las correlaciones con las que se hallaron los coeficientes de transferencia de calor tienen una desviación en los resultados, con la finalidad de que el sistema fuera capaz de suplir la demanda en el transcurso del tiempo.

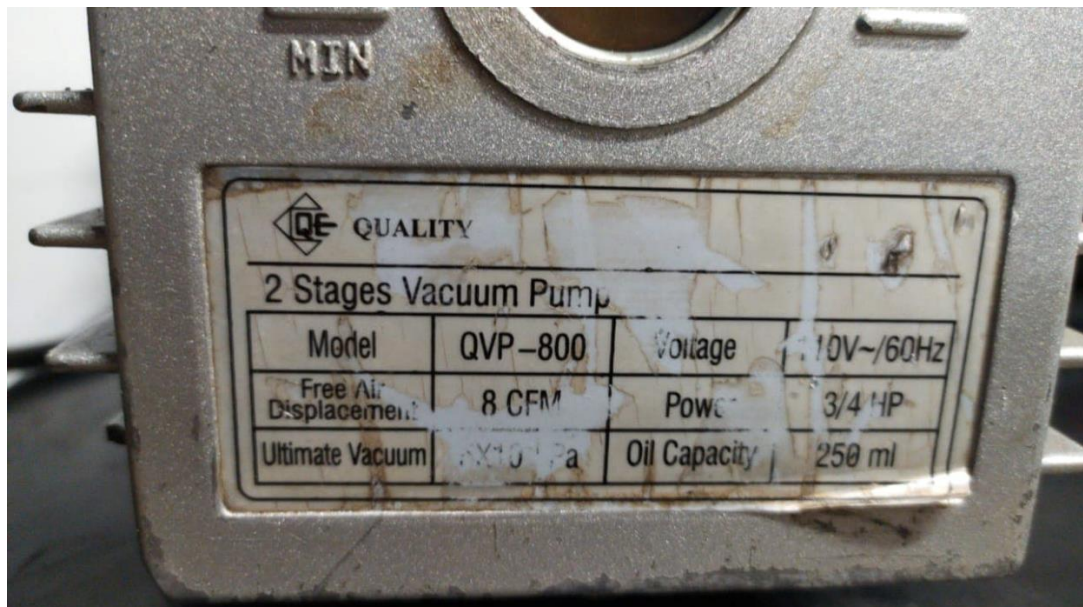
7. COSTOS

La empresa tiene como objetivo a futuro construir el sistema a escala, debido a que el caudal que tiene la PTAR es bastante alto para ser tratado en su totalidad por el prototipo, por lo cual se hace necesario realizar un estudio de viabilidad.

7.1 CONSUMO ELÉCTRICO DE ENERGÍA DEL PROTOTIPO

El consumo eléctrico de energía del sistema se limita exclusivamente al tiempo cuando la bomba de vacío se encuentra encendida, para el cálculo del consumo energético se tomó el voltaje y la corriente de la bomba de vacío y se planteó la relación que permite saber el consumo energético en función del tiempo de uso de la bomba y los litros destilados en el periodo de operación.

Figura 62. Parámetros de operación teóricos de la bomba de vacío utilizada.



La corriente y el voltaje medidos cuando se utilizó la bomba se muestran en la tabla 38, el producto de estos valores representa la potencia instantánea consumida por la bomba.

Tabla 38. Voltaje, corriente y potencia consumidas por la bomba.

PARAMETRO	VALOR
CORRIENTE (A)	8,34
VOLTAJE (V)	110
POTENCIA (W)	917,4

De esta forma dividiendo entre mil y dejando la expresión en función del tiempo y del destilado total se obtiene la expresión para el cálculo del consumo específico de potencia SPC:

$$SPC = 0,917 \left[\frac{\text{kW-h}}{\text{m}^3} \right]$$

Finalmente, al multiplicar el SPC por el valor del kWh para zonas industriales se obtiene el costo específico de la energía medida tipo IV para zona industrial el cual es de 429,66 \$/kWh. Para un día de funcionamiento continuo, basados en el comportamiento mostrado en las pruebas con el efluente de la PTAR y conociendo que por cada hora de trabajo la bomba funciona un promedio de 5 min se obtiene el costo de funcionamiento por hora y se presentan los resultados en la tabla 39.

Tabla 39. Costo de la energía eléctrica según el tiempo de uso.

HORAS DE FUNCIONAMIENTO	HORAS DE USO BOMBA DE VACIO [HORAS]	METROS CUBICOS DESTILADOS [m ³]	COSTO [\$]
1	0,08	0,15	210,10304
3	0,24	0,45	630,30912
5	0,4	0,75	1050,5152
7	0,56	1,05	1470,72128
9	0,72	1,35	1890,92736
11	0,88	1,65	2311,13344
13	1,04	1,95	2731,33952
15	1,2	2,25	3151,5456
17	1,36	2,55	3571,75168
19	1,52	2,85	3991,95776
21	1,68	3,15	4412,16384
24	1,92	3,6	5042,47296

7.2 COSTO DE CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

A continuación, se muestra en la tabla 40 y en las figuras 63 y 64 los costos empleados en el proceso de diseño, operación y puesta a punto del sistema de destilación de agua residual por doble efecto.

Tabla 40. Costos totales del desarrollo del proyecto.

CONCEPTO	COSTO
GASTOS GENERALES	
Papelería (memorias, planos, borradores, etc.)	\$150.000
Asesorías externas	\$200.000
Salario a pasantes	\$7.648.000
Subtotal	\$7.998.000
GASTOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN	
Evaporadores	\$22.000.000
Condensador	\$5.892.060
Conexión equipos	\$17.603.498
Montaje de equipos	\$6.053.554
Equipos de control	\$5.779.000
Bomba de vacío	\$2.000.000
Subtotal	\$59.328.000
GATOS OPERATIVOS	
Transporte	\$400.000
Otros	\$300.000
Subtotal	\$700.000
TOTAL	\$68.026.000

Figura 63. Diagrama circular de los costos del proyecto.

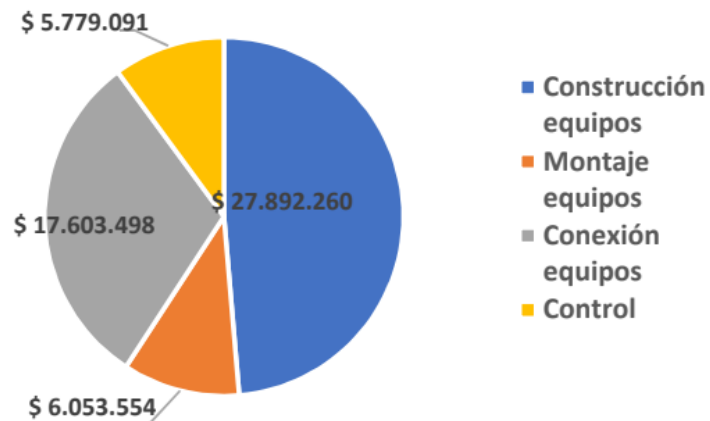
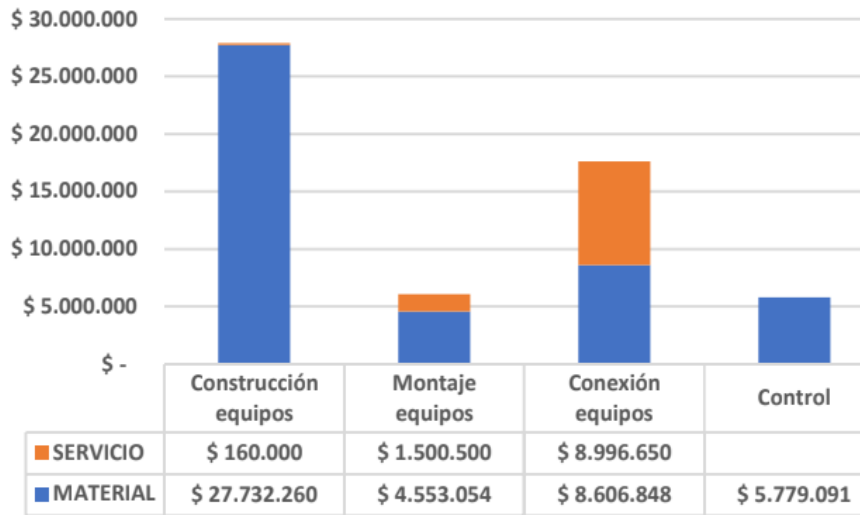


Figura 64. Diagramas de barras de los costos del proyecto.



7.3 VIABILIDAD Y DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA A ESCALA.

Conociendo el modelo de cálculo del prototipo y los valores de los coeficientes globales de transferencia de calor reales se procederá a interpolar estos valores para el modelo a escala, con la finalidad de conocer el área requerida, se conocen los siguientes datos:

Tabla 41. Datos reales del prototipo.

Parametro	Valor
T_{sat1}	92 [°C]
T_{sat2}	82 [°C]
$P_{vacíoIC1}$	76 [Kpa]
$P_{vacíoIC2}$	49 [Kpa]
V_{PTAR}	3600 [L/h]
U_{IC1}	1320 [W/(m ² *K)]
U_{IC2}	1250 [W/(m ² *K)]
U_{cond}	379 [W/(m ² *K)]

Con los datos los anteriores se determinan los siguientes valores para el sistema a escala:

Tabla 42. Datos del sistema a escala.

Parametro	Valor
A_{IC1}	92,63 [m ²]
A_{IC2}	67,87 [m ²]
A_{cond}	60 [m ²]
V_{cooker}	1758 [L/h]

Se conoce que el caudal total de vapor producido por los cookers es de $\bar{V}_{cooker} = 1908 \left[\frac{L}{h} \right]$, por lo que se concluye el sistema es viable para tratar toda el agua de la PTAR, cabe resaltar que sigue sobrando energía para tratar más agua, por lo que se puede sugerir que se realice el diseño para usar todo el caudal del vapor que se tiene actualmente y así poder satisfacer el aumento de los caudales de agua residual que se puedan generar debido al crecimiento de la empresa.

Tabla 43. Resultados con el sistema del total del vapor residual.

Parametro	Valor
A_{IC1}	100,5 [m ²]
A_{IC2}	73,66 [m ²]
A_{cond}	65,12 [m ²]
V_{cooker}	1908 [L/h]

En las pruebas se observó que caudal del vapor de cooker varia bastante, ya que depende de la carga del proceso por lo que se puede ver afectado el tratamiento del agua residual, no obstante, actualmente se está desarrollando un proyecto en la empresa para la implementación de un cooker continuo, el cual va a permitir tener un proceso continuo de secado y cocción de los subproductos que tendrá como resultado la generación de vapor residual de forma continua, motivando más el desarrollo de este sistema de postratamiento de agua residual a escala, adicionalmente, se va a generar el desuso de los intercambiadores de condensación del vapor residual, ya que se va a utilizar un aerocondensador que viene con el cooker continuo por lo que se pueden usar estos intercambiadores para el sistema a escala.

8 CONCLUSIONES

- Se diseñó, construyó e implementó un sistema de doble efecto para el tratamiento de agua por vaporización, utilizando como fuente de energía el vapor a la salida de los cookers en la planta de harinas de Avides Mac Pollo S.A. para tratar 150 l/h de agua de la salida de la planta de tratamiento (PTAR), con base a los modelamientos termodinámicos y de transferencia de calor, consiste de dos evaporadores-condensadores los cuales funcionan como productores de destilado del sistema, un condensador que se encarga de condensar el vapor destilado generado en el segundo efecto, dos tanques de condensado encargados de recolectar el destilado limpio 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 tanque IBC utilizado para la alimentación de agua residual al sistema y un sistema de control de nivel encargado de la reposición de agua residual dentro de los evaporadores-condensadores.
- Se identificaron los factores más influyentes que afectan la producción y calidad de los condensados como lo son: el caudal del vapor de cooker, el efecto de la reposición de agua, el nivel de agua en los evaporadores y el nivel de vacío en el sistema.
- Se comprobó que la variabilidad del vapor de cooker disponible afecta notoriamente la producción de condensados objetivos del proceso (agua depurada), dado que los cookers tienen una producción descendente de vapor en la medida en que los subproductos (vísceras, picos, etc) van perdiendo su humedad, adicionalmente, estos baches no tienen una composición inicial de humedad uniforme.

- Se evidenció que la reposición del nivel de agua residual en los evaporadores-condensadores afectaba su presión absoluta y su temperatura, las cuales se vieron aumentadas debido al incremento del volumen de líquido en el sistema, producto de que solo entraba líquido al sistema y que la salida de los condensados no era continúa produciendo una acumulación temporal de líquido dentro del sistema.
- Se probó que tener un control de nivel exacto permite mejorar la calidad de los condensados, ya que evita que exista arrastre de líquido en el sistema ocasionado por la turbulencia de la vaporización o por la formación de espuma debido a los contaminantes del agua.
- Se observó que el nivel de vacío en cada uno de los dos efectos de vaporización determina las diferencias de temperatura adecuadas entre la fuente de calor y el líquido a vaporizar, de tal manera que a disminuir el vacío los niveles de condensados disminuyeron sustancialmente.
- Se operó el sistema continuamente durante un periodo de 6,5 horas obteniéndose una producción de condensado promedio de 149 [l/h] (a pesar de presentar pérdidas de calor debido al no aislamiento de los evaporadores) con un consumo específico de energía (SPC) de 0,917 [kWh/m³], lo cual representa una gran opción para implementar dicho sistema a una mayor escala dado que el SPC no se aumentaría sustancialmente, ya que depende exclusivamente de la bomba de vacío.
- Se comprobó la viabilidad de producción de un equipo a escala real dado que con la introducción del cooker continuo se eliminaría en gran parte el problema del caudal variable de vapor residual disponible permitiendo el tratamiento de la totalidad de las aguas de desecho de la planta.

- Los resultados de las pruebas de laboratorio demostraron que el sistema es altamente efectivo al disminuir los niveles de DBO, SST y CLORUROS logrando unos porcentajes de reducción de 66%, >83% y 99% respectivamente en comparación con lo exigido por la resolución 0635 del 2015 del MADS (ministerio de ambiente y desarrollo sostenible).
- El desarrollo de proyectos para dar solución a problemas concretos de la industria permite reforzar la capacidad de trabajo en equipo, observar la importancia de una correcta organización de la planeación de las etapas de un proyecto, el desarrollo de la iniciativa para proponer soluciones prácticas y la capacidad para trabajar bajo presión.
- Se realizó el manual de uso y mantenimiento del sistema el cual se encuentra disponible en la sección de anexos.

9 RECOMENDACIONES

- Mejorar el monitoreo del nivel dentro de los evaporadores-condensadores mediante la utilización de mirillas de mayor capacidad de observación de nivel, debido a la falsa ubicación del nivel mostrado en los indicadores actuales.
- Se recomienda colocar baffles en el cabezal superior de los evaporadores para prevenir el arrastre de líquido en la corriente de vapor destilado.
- Con el fin de mejorar el tiempo de calentamiento y evitar que el ingreso de agua afecte de manera significativa el estado cuasiestable, se propone implementar un sistema de precalentamiento del agua.
- Aislar térmicamente para aumentar la eficiencia del sistema al disminuir sus pérdidas de calor hacia el ambiente y evitar posibles quemaduras debido a la superficie caliente de los equipos.
- Instalar sensores analógicos de temperatura tipo RTD y transductores de presión de vacío en conjunto con un sistema de adquisición de datos con el fin de mejorar el monitoreo del sistema.
- Utilizar una bomba de vacío seca o un soplador para realizar vacío con el fin de evitar el cambio de aceite constante.

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.

ARANDA, Christian. Tratamiento biológico de aguas residuales. [En línea]. Tratamiento biológico de aguas residuales. 2013. (Recuperado el 10 septiembre 2019). Disponible en: <http://israeltratamientobiologico.blogspot.com/>

CBM. Depuración de aguas residuales. [En línea]. (Recuperado el 26 septiembre 2019). Disponible en: <https://bit.ly/2twhIG9>

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.

COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPUBLICA. Decreto 1594 (26, junio, 1984). Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II y el Título III de la Parte III -Libro I- del Decreto - Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos. Ministerio de agricultura. Bogotá, D.C., 1984.

COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPUBLICA. Resolución 0631 (17, marzo, 2015). Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. Diario oficial. Bogotá, D.C., 2015, no. 49486. p. 10.

CONDORCHEM ENVITECH. Tratamiento de aguas residuales industriales mediante evaporación al vacío. [En línea]. (Recuperado el 15 agosto 2018). Disponible en: <https://bit.ly/2XgQvzc>

CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS POR NITRATOS. Tratamiento de aguas residuales. [En línea]. (Recuperado el 26 septiembre 2018). Disponible en: http://members.tripod.com/london_job/trabajoseninglaterra/id29.html

ERNEST, U, Heat exchanger design handbook. USA: Hemisphere, 1976. Capítulo 1 al 4.

FEDERACION NACIONAL DE AVICULTORES DE COLOMBIA Y MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Guía ambiental para el subsector avícola. Bogotá. 2014. Pag 8.

KERN, Donald, Procesos de transferencia de calor: McGraw- Hill, 1999. Pp 213-369.

OCHOA, Danny. Introducción al tratamiento de aguas residuales. [En línea]. (Recuperado el 26 septiembre 2018). Disponible en: <https://bit.ly/2STfyde>

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. Métodos o tipos de tratamiento de aguas residuales. [En línea]. 2014. (Recuperado el 10 septiembre 2018). Disponible en: <https://tratamientodeaguasresiduales.net/tipos/>

VERA, Juan Y. GÓMEZ, Miguel. Diseño y construcción de un prototipo de destilador por compresión de vapor para purificar aguas de desecho de la planta de beneficio de Avidesa Mac pollo S.A. Proyecto de grado, ingeniero mecánico. Bucaramanga: Universidad industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicomecánicas. Escuela de ingeniería mecánica, 2017. pp. 24-65.

VERAS, M. Las aguas residuales. [En línea] Alternativas para cuidar el medio ambiente. 2015. (Recuperado el 21 abril 2018). Disponible en: <https://bit.ly/2T77TYe>