

**DISEÑO DE UN EVAPORADOR PILOTO PARA LA REUTILIZACIÓN DE
AGUAS DE VERTIMIENTO EN LA COMPAÑÍA ELÉCTRICA SOCHAGOTA**



JORDAN OMAR SANTAMARIA MENDEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2018

**DISEÑO DE UN EVAPORADOR PILOTO PARA LA REUTILIZACIÓN DE
AGUAS DE VERTIMIENTO EN LA COMPAÑÍA ELÉCTRICA SOCHAGOTA.**



JORDAN OMAR SANTAMARIA MENDEZ

Trabajo presentado como requisito
para obtener el Título de Ingeniero Químico
Modalidad práctica empresarial

Directora de tesis:

Debora Nabarlatz

PhD UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI Graduate Studies in Chemical and
Process Engineering Octubre de 2002 - Septiembre de 2006 Autohydrolysis of
agricultural byproducts for the production of xylo-oligosaccharides

Codirector

Ph.D. Fredy Avellaneda Vargas

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA

2018

DEDICATORIA

A mi familia por su motivación y apoyo en todo el proceso formativo, por soportar todas mis ausencias y darme su amor y comprensión.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha llegado a este nivel de maduración, gracias a la ayuda, inspiración, formación y orientación en la ejecución por parte del asesor de tesis, sin cuya guía no habría tenido lugar esta tesis.

Así mismo, con toda gratitud a todas las personas que contribuyeron al éxito de esta investigación.

«Los científicos estudian el mundo tal como es; los ingenieros crean el mundo que nunca ha sido».

Theodore Von Karman (1881 – 1963)

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	16
1. OBJETIVOS.....	19
1.1 OBJETIVO GENERAL	19
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
2. MARCO TEÓRICO	20
2.1 PROCESO DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	20
2.2 EVAPORACIÓN.....	21
3. METODOLOGÍA	25
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	28
4.1 CÁMARA DE EVAPORACIÓN	29
4.1.1 Selección del tipo de evaporador.....	29
4.1.2 Caracterización del agua de vertimiento	29
4.1.3 Caracterización de los efluentes	31
4.1.4 Características del agua necesaria para la refrigeración	32
4.1.5 Diseño de la cámara de evaporación.....	33
4.1.6. Diseño mecánico de carcasa, espejos y tapa	37
4.1.7 Diseño mecánico de tubos.....	38
4.2 CUERPO DEL EVAPORADOR	38
4.3 CONDENSADOR.....	40
4.4 BOMBA DE VACÍO	41
4.5 RESULTADOS DEL DISEÑO DEL EVAPORADOR	41
4.6 Análisis económico	47
5. CONCLUSIONES	49
6. RECOMENDACIONES.....	51
7. BIBLIOGRAFÍA	52
ANEXOS	55

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama de corrientes en la CES	21
Figura 2. Verticales de tubo corto	24
Figura 3. Evaporador vertical de tubo largo	24
Figura 4. Evaporador de circulación forzada	24
Figura 5. Evaporador de tubo horizontal.....	24
Figura 6. Diagrama de flujo metodología	25
Figura 7. Esquema de las etapas que componen el evaporador	28
Figura 8. Esquema del cuerpo del evaporador	39
Figura 9. Esquema del condensador	40
Figura 10. Valor presente neto (VPN).....	49
Figura 11. Flujo de caja mensual	49

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Tipos de evaporadores	23
Tabla 2. Características del agua de vertimiento	30
Tabla 3. Características agua de reposición para torre de enfriamiento	32
Tabla 4. Datos para el diseño de la cámara de evaporación	33
Tabla 5. Diseño termodinámico cámara de evaporación	34
Tabla 6. Diseño mecánico de tubos.....	38
Tabla 7. Datos de entrada y salida del condensador	41
Tabla 8. Características técnicas de la bomba de vacío	41
Tabla 9. Dimensionamiento de la cámara de evaporación	42
Tabla 10. Diseño de la cámara de evaporación desde el punto de vista termodinámico	43
Tabla 11. Especificaciones del condensador desde el punto de vista termodinámico	44
Tabla 12. Resumen de dimensiones sistema de evaporación	46

ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Carta psicométrica	55
Anexo B. Balance de energía para el cálculo del caudal	55
Anexo C. Numero de tubos para el cálculo del caudal	56
Anexo D. Balance de masa para el condensador	56
Anexo E. Cálculo del caudal	56
Anexo F. Balance de masa para el cálculo del caudal.....	57
Anexo G. Cantidad necesaria de calor para el cálculo del caudal	57
Anexo H. Área de intercambio de calor para el cálculo del caudal	58
Anexo I. Balance de energía para el condensador	58
Anexo J. Costos actuales de vertimiento y otros costos	60
Anexo K. Costos de instalación y operación evaporador y condensador	62
Anexo L. Flujo de caja mensual VPN.....	63
Anexo M. Análisis económico - costo total del evaporador.....	65
Anexo N. Análisis económico - costo del condensador	65
Anexo O. Análisis económico caudales de fluidos.....	66
Anexo P. Análisis económico - costos operativos [USD/m3]	66
Anexo Q. Costos actuales de captación de agua	67

NOMENCLATURA

- X_{H_2O} [Concentración de agua en la corriente]
- X_{sto} [Concentración de solidos totales (soluto) en la corriente]
- \dot{m} [Flujo másico de la corriente]
- ρ [Densidad]
- Q [Caudal]
- T [Temperatura]
- λ [Calor latente de vapor]
- C_p [Calor específico a presión constante]
- q [Cantidad de calor]
- A [Área de transferencia de calor]
- ΔT [Diferencia de temperaturas]
- U [Coeficiente global de transferencia de calor]
- n [número de tubos]
- D_0 [Diámetro de tubo]
- L [longitud de tubo]
- A_P [área trasversal total de los tubos pequeños]
- A_c [Área del círculo]
- r [radio]

GLOSARIO

ABSORCIÓN: Concentración selectiva de sólidos disueltos en el interior de un material sólido, por difusión.

ABULTAMIENTO DEL LODO: Proliferación de organismos filamentosos en el licor mixto que causa un deterioro en la asentabilidad del lodo.

ACIDEZ: Capacidad de una solución acuosa para reaccionar con iones hidroxilo. Se mide cuantitativamente por titulación con una solución alcalina normalizada y se expresa usualmente en términos de mg/l como carbonato de calcio.

ACIDOGÉNESIS: Etapa básica del proceso anaerobio en la cual las moléculas pequeñas, producto de la hidrólisis, se transforman en hidrógeno, gas carbónico y ácidos orgánicos (butírico, propiónico y acético).

ADSORCIÓN: Transferencia de una masa gaseosa, líquida o de material disuelto a la superficie de un sólido.

AFLUENTE: Agua residual u otro líquido que ingrese a un reservorio, o algún proceso de tratamiento.

AIREACIÓN: Método utilizado en el tratamiento de aguas para oxigenar las aguas residuales. Ayuda a mantener el medio homogenizado. El agua se coloca en contacto con suministros de aire como lo son los difusores de forma artificial para mantener la salida de gotas de aire hacia la superficie del agua.

CLARIFICADOR: Componente clave en el tratamiento de aguas residuales. Consiste de un tanque de sedimentación que ayuda a eliminar los contaminantes y concentrarlos en los lodos que se generan, lo que reduce la cantidad de volumen de requerido en filtro-prensa.

DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGENO (DBO): Indicador del potencial contaminante de un efluente, en el que la contaminación se debe a la utilización del oxígeno disuelto por parte de los microorganismos que descomponen la materia orgánica presente en el efluente. Se mide como el peso (en mg) de oxígeno consumido en un litro de muestra del efluente almacenado a la oscuridad a 20° C.

DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO (DQO): Expresa el contenido de materias orgánicas oxidables y contaminantes en aguas.

EFICIENCIA DEL TRATAMIENTO: es el porcentaje de concentración que se remueve de un efluente en el tratamiento de aguas residuales para un determinado parámetro evaluado.

LODO ACTIVADO: proceso de tratamiento por el cual el agua residual y el lodo biológico (microorganismos) son mezclados y aireados en un tanque denominado reactor. Los flóculos biológicos formados en este proceso se sedimentan en un tanque de sedimentación, lugar del cual son recirculados nuevamente al tanque aireador o reactor.

MUESTRA PUNTUAL: conocida también como muestra simple, es una muestra de agua residual tomando en cualquier instante de tiempo para ser analizada en la caracterización del agua.

MUESTRA COMPUESTA: es una mezcla de varias muestras puntuales o simples tomadas en un mismo punto del efluente de agua durante diferentes intervalos de tiempo.

OXÍGENO DISUELTO: cantidad de oxígeno que se encuentra presente en el agua. Es un componente esencial para la vida de cuerpos de agua. pH: expresa condiciones básicas, ácidas y neutras de una solución. Es medido en escala de 0 a 14, donde 7 expresa que la sustancia es neutra. Los valores por encima de 7 indican que la sustancia es básica y los valores por debajo de 7 indican que la sustancia es ácida.

RESUMEN

TITULO: DISEÑO DE UN EVAPORADOR PILOTO, PARA LA REUTILIZACION DE AGUAS DE VERTIMIENTO*

AUTOR: JORDAN OMAR SANTAMARIA MENDEZ**

PALABRAS CLAVE: evaporador, tratamiento de aguas residuales, vertimiento, reutilización, electricidad.

DESCRIPCION: La ejecución de procesos hidroeléctricos en el territorio colombiano ha sido realizada por varias empresas, una de ellas es la Compañía Eléctrica de Sochagota CES S.A., la cual abastece de energía mediante generación termoeléctrica a los departamentos de Cundinamarca y Boyacá. Debido a la necesidad de tratamiento de sus aguas residuales, se requiere el diseño de un evaporador piloto que se ajuste a los requerimientos definidos por la empresa CES S.A., el cual debe permitir el tratamiento del agua de vertimientos garantizando que las composiciones de contaminantes en el agua se encuentren en los niveles permitidos para realizar la recirculación de la misma. Al reutilizar los vertimientos de agua generados mediante la implementación de la evaporación, permiten que la empresa CES S.A. pueda alcanzar la meta de cero vertimientos que contaminan los ríos de nuestro país, reduciendo de manera positiva los aspectos ambientales. Para desarrollar el sistema de evaporación se diseñaron los cuatro elementos fundamentales como lo son: la cámara de evaporación, la implementación del cuerpo del evaporador, la definición de las características del condensador con el fin que realice el cambio de fase de gas a líquido del agua ya tratada y finalmente se establecieron las condiciones de la bomba de vacío para facilitar la evaporación y condensación. Así mismo, se realizó el análisis económico considerando los costos operativos, y los costos de inversión relacionados con los costos de instalación, operación del evaporador y condensador, comparándolos con los costos actuales de captación de agua y de vertimiento.

* Trabajo de grado

** Facultad de ingenierías Físico-Químicas. Escuela de ingeniería química.

Director: Debora Alcida Nabarlatz, Ingeniera química, PhD

ABSTRACT

TITLE: DESIGN OF A PILOT EVAPORATOR, FOR THE REUSE OF WATER FROM DUMPING *

AUTHOR: JORDAN OMAR SANTAMARIA MENDEZ**

KEYWORDS: evaporator, wastewater treatment, shedding, reuse, electricity.

DESCRIPTION: The execution of hydroelectric processes in the Colombian territory has been carried out by several companies, one of which is the Sochagota Electric Company CES S.A., which tests power by thermoelectric generation in the departments of Cundinamarca and Boyacá. Due to the need for wastewater treatment, the design of a pilot evaporator that meets the requirements defined by the company CES SA is required, which should allow the treatment of water from discharges, ensuring that the pollutant compositions in the water is in the permitted levels to perform the recirculation of it. By reusing the water discharges generated by the implementation of evaporation, they allow the company CES S.A. can achieve the goal of zero dumping that pollutes the rivers of our country, reducing positively the environmental aspects. To develop the evaporation system, the four fundamental elements were designed, such as: the evaporation chamber, the implementation of the evaporator body, the definition of the characteristics of the condenser in order to change the phase from gas to liquid in the water already treated and finally the conditions of the vacuum pump were established to facilitate evaporation and condensation. Likewise, the economic analysis was carried out considering the operating costs, and the investment costs related to the costs of installation, operation of the evaporator and condenser, comparing them with the current costs of water capture and dumping.

*Degree work

** Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of chemical engineering.

Director: Debora Alcida Nabarlatz, Chemical Engineer, PhD

INTRODUCCION

La creciente demanda energética dada por el crecimiento poblacional de países en vía de desarrollo ha provocado la necesidad de generar, de manera constante y eficiente energía eléctrica para abastecer las necesidades de las industrias y de los hogares en cada una de las ciudades de estos territorios. Para el caso puntual colombiano, teniendo en cuenta la imposibilidad de construir hidroeléctricas en el centro geográfico del país, además de contar con la disponibilidad de un recurso energético como el carbón en los departamentos de Cundinamarca y Boyacá, las centrales de generación termoeléctrica se perfilaron para continuar siendo una solución óptima a los requerimientos energéticos en estas zonas del territorio colombiano, y una de las principales plantas de generación de este tipo, que además abastece cerca del 25%¹ de la electricidad requerida es la Compañía Eléctrica Sochagota CES S.A.

La CES S.A. es una compañía surgida de la invitación del estado colombiano a inversionistas extranjeros privados para construir y operar plantas termoeléctricas con tecnología de punta en distintos puntos de Colombia, posterior a la vulnerabilidad del sector eléctrico colombiano evidenciado a principios de los años noventa, con una de las crisis energéticas más profundas que ha sufrido el país en su historia. La planta Termopaipa IV, construida y operada por la Compañía Eléctrica de Sochagota, es una planta de generación a base de carbón resultado de dicha política estatal; se encuentra ubicada en el municipio de Paipa (Boyacá) con una capacidad neta de 150 MW, operando con tecnología de punta y equipada con un avanzado sistema de control y protección ambiental que cumple con los mejores estándares en materia de disminución del ruido, protección del aire y fuentes de agua.

Asimismo, dicha planta de producción de energía eléctrica cuenta con 4 líneas de producción principales, entre las cuales se encuentran la planta de tratamiento y

¹ XM S.A. E.S.P. Informe de Operación del SIN y Administración del Mercado. Medellín. (Recuperado en mayo de 2018) Disponible en: <http://informesanuales.xm.com.co/2015/SitePages/operacion/2-6-Capacidad-efectiva-neta.aspx>

clarificación de agua, la unidad de ósmosis inversa, la caldera térmica, y finalmente, la línea principal compuesta por la turbina y el generador. Sin embargo, la operación de las termoeléctricas ocasiona daños ambientales, debido principalmente a la emisión a la atmósfera de óxidos de carbono producto de la combustión del carbón para la vaporización del agua de alimento de las turbinas, además del vertimiento de aguas residuales a fuentes hídricas. Por ello, la CES S.A. tiene como objetivo ser una de las termoeléctricas que genere menor contaminación, con el fin de producir energía sin hacer daño al medio ambiente.

A corte 30 de junio de 2016², el caudal de agua residual vertido por la compañía osciló entre 40 y 70 m³/h, y en su composición química se incluyen contaminantes tales como fosfatos, sulfatos, nitratos, sales, minerales, entre otros; que aunque están regulados por las autoridades competentes (ANLA³, CORPOBOYACA, Ministerio del Medio Ambiente), están por debajo de la concentración máxima que se tiene permitida para hacer la disposición del líquido, la prioridad de la compañía es que los vertimientos de agua que tienen como destino el río Chicamocha sean minimizados, hasta llegar a una meta de cero vertimientos, es decir, realizar el tratamiento del agua resultante de la operación para que pueda ser reutilizada en el proceso.

Es necesario aclarar que la compañía está implementando una medida de mitigación del impacto ambiental, al incluir el proceso de ósmosis inversa para obtener agua desmineralizada previa al ingreso a la caldera; sin embargo, es prioritaria la implementación de la evaporación para retirar las impurezas descritas anteriormente y que pueda alcanzarse la meta de cero vertimientos.

Con base en lo anterior, este proyecto se enfoca en el diseño de un equipo evaporador piloto que se ajuste a los requerimientos de la empresa CES S.A., y que permita, desde el punto de vista técnico y económico, un tratamiento del agua de vertido que garantice que las composiciones de contaminantes en el agua se encuentren en los niveles permitidos para realizar la recirculación de la misma.

² Volumen cuantificado y verificado por el autor en el rol de practicante de la empresa CES S.A.

³ Resolución 631 de 2015

Por lo expuesto, se propone el diseño conceptual de un evaporador a escala piloto que permita la eliminación de los contaminantes presentes en las aguas de vertimiento provenientes de las purgas en los diferentes elementos que componen el esquema de flujo del agua de captación a través del ciclo de generación de energía eléctrica.

El objetivo es diseñar un equipo capaz de operar a las condiciones de la compañía permitiendo la realización de un tratamiento y posterior recirculación de 100 L/h (litros por hora) en su etapa piloto, y que posteriormente pueda ser escalado para tratar el volumen total de vertimientos en la compañía, es decir que se encuentre entre 40 y 70 m³/h. Se estima que la realización de este proyecto tenga un impacto considerable, desde el punto de vista ambiental, teniendo en cuenta que la implementación a escala de la planta de generación derivará en una reducción gradual de los vertimientos de aguas residuales, el cual, representará a su vez una considerable disminución en el volumen de captación, considerando que la totalidad del fluido que previamente se vertía será recirculado, y sólo debe compensarse el volumen perdido en las torres de enfriamiento, por otro lado, implica un ahorro en los costos de servicios industriales en relación al consumo de agua. De esta manera se espera la replicación de los resultados en función del ahorro de agua y energía para la aplicación en otras hidroeléctricas, contribuyendo a un desarrollo integrado de las políticas hídricas y energéticas.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar un evaporador piloto para la recuperación de efluentes que permita la obtención de agua de calidad de acuerdo con los parámetros del proceso establecidos por la Compañía Eléctrica de Sochagota – CES S.A. para su uso en el sistema de refrigeración del condensador.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar el proceso de evaporación a escala piloto para la recuperación de los vertimientos acuosos de la CES S.A que permita el reúso de los mismos en la torre de enfriamiento.
- Establecer el tipo de aplicabilidad de un evaporador piloto para la recuperación de efluentes que permita la obtención de agua de calidad de acuerdo con los parámetros del proceso establecidos por la CES S.A para su uso en el sistema de refrigeración del condensador.

2. MARCO TEÓRICO

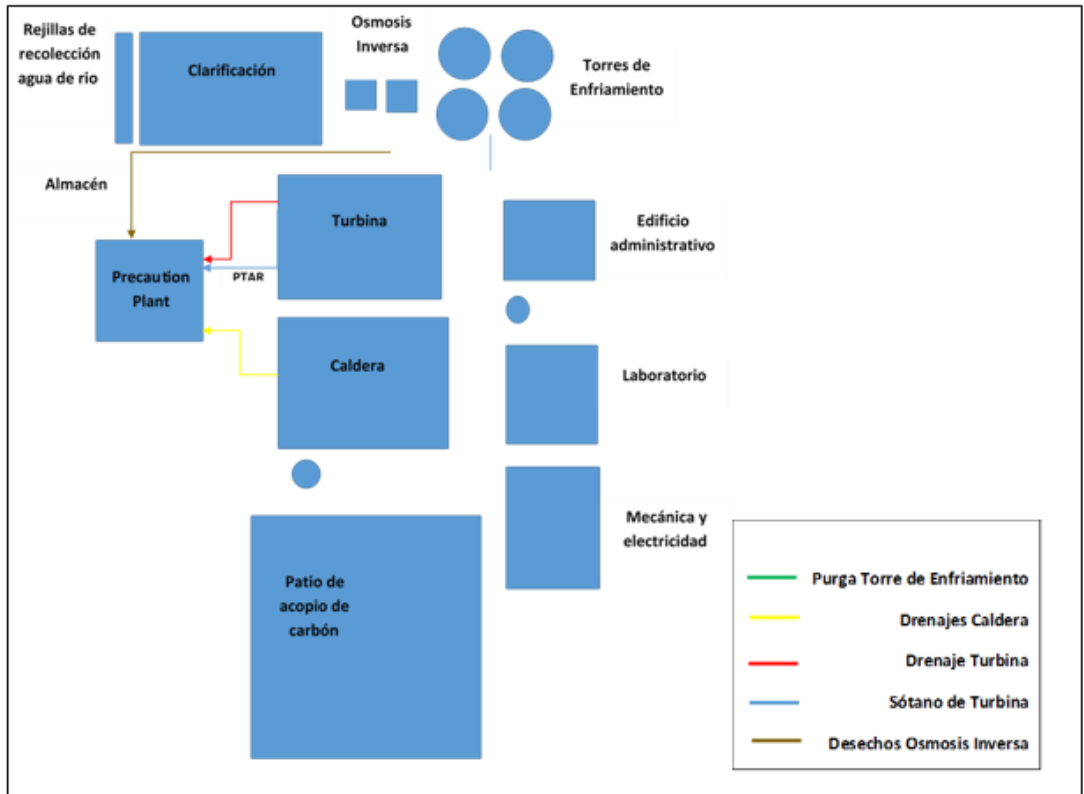
2.1 PROCESO DE GENERACIÓN DE ENERGÍA

En la actualidad existen diferentes tipos de centrales termoeléctricas clasificadas de acuerdo con el tipo de combustible, el fluido a calentar (agua o gas), el tipo de generador de vapor, etc.; y el funcionamiento de todas las centrales térmicas, o termoeléctricas, es similar. El combustible es suministrado por medio de una correa transportadora que lo lleva hasta la caldera en donde se provoca la combustión. La energía liberada se emplea para calentar el agua que pasa por la caldera produciendo vapor, el cual se encuentra en la zona de vapor sobrecalentado y a alta presión. Éste provoca que giren los álabes de una turbina, cuyo eje rotor está conectado a un generador que produce la energía eléctrica, la cual es inyectada a la red eléctrica⁴. Producto de esta operación, se generan diversos efluentes líquidos, los cuales son aguas de diferentes procedencias con alto contenido de contaminantes.

La solución de aguas residuales que se debe tratar para su posterior disposición o recirculación es una mezcla de corrientes procedentes de diferentes partes del proceso, como la purga en la torre de enfriamiento, los drenajes de la caldera, el drenaje de la turbina y el sótano de turbina, es decir, el depósito (conducto) para la salida de aire. En la medida en que el proceso transcurre, la purga continúa desde la caldera y en su flujo, se añaden a ella residuos de diferentes procesos en la producción de agua desmineralizada, como se muestra en el esquema de corrientes de la figura 1.

⁴ SOTO, I.S., WERNER, L.R., Evaluación técnica y económica de una central termoeléctrica en la región de los ríos. Universidad Austral de Chile, Escuela de Ingeniería Civil Mecánica, septiembre 2009.

Figura 1. Diagrama de corrientes en la CES



Fuente: Compañía eléctrica CES S.A., diagrama de corrientes de vertimiento. 2017.

2.2 EVAPORACIÓN

Existen distintos tipos de tratamiento de las aguas residuales para lograr remover los contaminantes. Se pueden usar desde sencillos procesos físicos como la sedimentación, en la que se deja que los contaminantes se depositen en el fondo por gravedad, hasta complicados procesos químicos, biológicos, térmicos o una combinación de ellos como es el caso de la evaporación, el cual es un proceso fisicoquímico. El evaporador emplea calor para concentrar soluciones o para recuperar sólidos disueltos por precipitación desde soluciones saturadas. Son

rehervidores con instalaciones especiales para la separación de fases de líquido-vapor y para la eliminación de sólidos cuando se precipitan o cristalizan.⁵

En la evaporación, por lo general, el producto valioso es el líquido concentrado (licor espeso) mientras que el vapor se condensa y se desecha. Sin embargo, en un caso específico es probable que ocurra lo contrario. El agua mineral se evapora con frecuencia a fin de obtener un producto exento de sólidos para la alimentación de calderas, para procesos con requerimientos especiales o para el consumo humano. Esta técnica se conoce con frecuencia con el nombre de destilación de agua, pero técnicamente se conoce como evaporación.⁶

También existen diversas modalidades para aplicar este proceso como lo es la evaporación al vacío, que consiste en reducir la presión del interior de la caldera por debajo de la presión atmosférica, lo que permite reducir la temperatura de ebullición del líquido a evaporar lo que reduce la cantidad de calor a aportar/eliminar en el proceso de ebullición y condensación, además de otras ventajas técnicas como la de poder destilar líquidos con alto punto de ebullición, evitar la descomposición de sustancias sensibles a la temperatura, etc.⁷

Los evaporadores consisten en un intercambiador de calor para hervir la solución con especiales disposiciones para la separación de las fases líquido y vapor. La mayor parte de la industria de evaporadores tiene superficies de calentamiento tubulares. Los tubos pueden ser horizontales o verticales, largos o cortos; el líquido puede estar dentro o fuera de los tubos. La tabla 1 muestra un resumen realizado por Basantes, Montesdeoca y Santos⁸, en el cual se muestran las

⁵ WALAS, S. M., Chemical Process Equipment Selection and Design. p. 208, 1988.

⁶ McCABE, W., SMITH, J.C., HARRIOT, P., Operaciones unitarias en ingeniería química, Ed. McGRAW-HILL, P 510-511, 2007.

⁷ CASTELLS, X. E. Reciclaje de residuos industriales: aplicación a la fabricación de materiales para la construcción, 2da Edición, Días de Santos S.A., 2009.

⁸ BASANTES M.F., MONTESDEOCA P. N. y SANTOS T. M. Diseño, construcción y puesta en marcha de un evaporador de simple efecto de tubos verticales cortos. Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2014.

ventajas, desventajas mejores aplicaciones y dificultades de los principales tipos de evaporadores.

Tabla 1. Tipos de evaporadores

Tipo de evaporador: Circulación Forzada			
Ventajas	Desventajas	Mejores Aplicaciones	Dificultades
<ul style="list-style-type: none"> * Coeficientes de transferencia de calor elevados. * Circulación positiva. * Libertad relativa de ensuciamiento. 	<ul style="list-style-type: none"> * Costo elevado * Energía necesaria para la bomba de circulación. * Tiempo de residencia o retención relativa alto. 	<ul style="list-style-type: none"> * Productos cristalinos. * Soluciones corrosivas. * Soluciones viscosas. 	<ul style="list-style-type: none"> * Atascamiento de las entradas de los tubos por depósitos de sales. * Mala circulación, debido a pérdidas de cargas más altas que las esperadas. * Formación de deposiciones de sales, debido a la ebullición en los tubos. * Corrosión y erosión.
Tipo de evaporador: Verticales de tubo corto			
Ventajas	Desventajas	Mejores Aplicaciones	Dificultades
<ul style="list-style-type: none"> * Coeficientes de transferencia de calor elevados con diferencias altas. * Espacio superior bajo. * Libertad relativa de ensuciamiento. * Eliminación mecánica y sencilla de las escamas. 	<ul style="list-style-type: none"> * Inadecuada transferencia de calor lo que indica variaciones en las temperaturas con tendencia a la baja. * Espacio elevado de terreno y peso alto. * Retención relativamente alta. * Mala transferencia de calor con líquidos viscosos. 	<ul style="list-style-type: none"> * Líquidos limpios. * Productos cristalinos. * Líquidos relativamente no corrosivos, si se construye de materiales que no sean hierro colado o acero dulce. * Formación ligera de escamas, que requieren una limpieza mecánica. 	<ul style="list-style-type: none"> * No aptos para soluciones viscosas. * Alto tiempo de residencia de la solución en el evaporador. * Si la diferencia de temperatura es baja, los coeficientes de transferencia son bajos.
Tipo de evaporador: Verticales de tubo largo			
Ventajas	Desventajas	Mejores Aplicaciones	Dificultades
<ul style="list-style-type: none"> * Bajo costo. * Superficie amplia de calentamiento. * Baja retención. * Necesidad de poco espacio de terreno. * Buenos coeficientes de transferencia de calor con pocas diferencias de T. 	<ul style="list-style-type: none"> * Espacio superior elevado. * No son adecuados para líquidos que forman depósitos de sales o escamas. * Requiere recirculación para la versión de película descendente. 	<ul style="list-style-type: none"> * Con líquidos limpios. * Con líquidos espumosos. * Con soluciones corrosivas. * Con grandes cargas de evaporación. * Con diferencias elevadas de T y con diferencias bajas de T. 	<ul style="list-style-type: none"> * Sensibilidad de las unidades de película ascendente a los cambios de las condiciones operacionales. * Mala distribución del material de alimentación a las unidades de película descendente.
Tipo de evaporador: Verticales de tubo horizontal			
Ventajas	Desventajas	Mejores Aplicaciones	Dificultades
<ul style="list-style-type: none"> * Espacio superior muy bajo. * Buenos coeficientes de transferencia de calor. 	<ul style="list-style-type: none"> * No son adecuados para los líquidos que dejan depósitos de sales. * Inapropiados para los líquidos que forman escamas. * Costo elevado. 	<ul style="list-style-type: none"> * Espacio superior elevado. * Pequeña capacidad. * Líquidos que no formen depósitos de sales o escamas. 	<ul style="list-style-type: none"> * No son adecuados para los líquidos que dejan deposiciones de sales. * Inapropiados para los líquidos que forman escamas. * Costo elevado (tipo de tubo acodado). * Mantenimiento de la distribución de líquido (tipo de película).

Fuente: BASANTES M.F., MONTESDEOCA P. N. y SANTOS T. M. Diseño, construcción y puesta en marcha de un evaporador de simple efecto de tubos verticales cortos. Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2014. p. 19.

A continuación, se presentan las figuras de los diferentes tipos de evaporadores:

Figura 2. Verticales de tubo corto

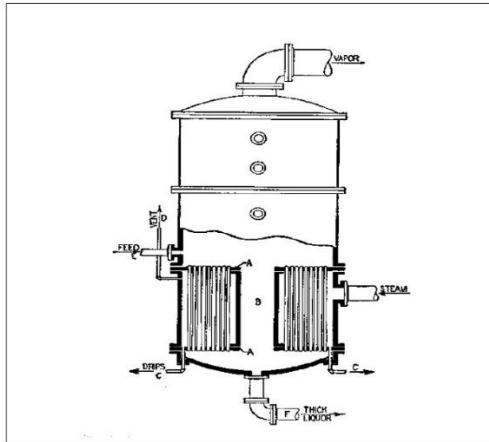
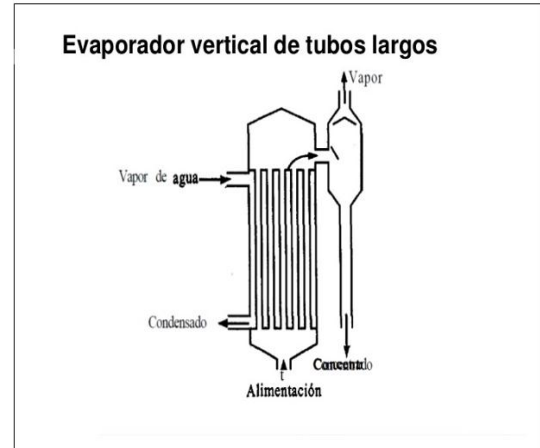


Figura 3. Evaporador vertical de tubo largo



Fuente: UNIVERSIDAD DE SEVILLA, Arquitectura e Ingeniería: Operaciones básicas / Tema 10. Evaporación [en línea]. s.f. p. 6. [consultado 04 de Mayo de 2018]. Disponible en Internet: http://ocwus.us.es/arquitectura-e-ingenieria/operaciones-basicas/contenidos1/tema10/pagina_06.htm

Figura 4. Evaporador de circulación forzada

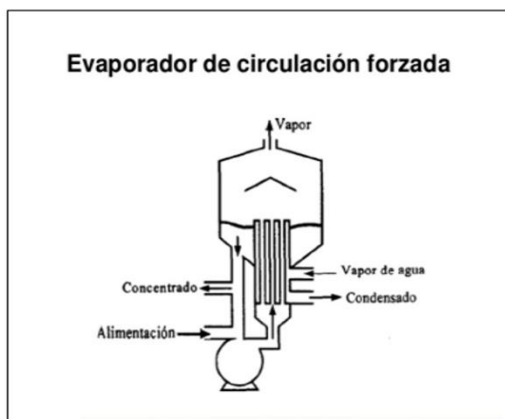
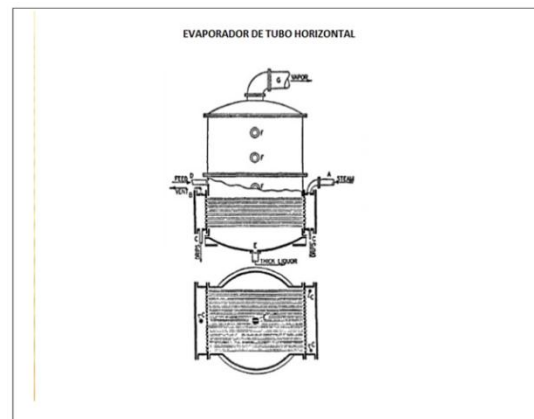


Figura 5. Evaporador de tubo horizontal

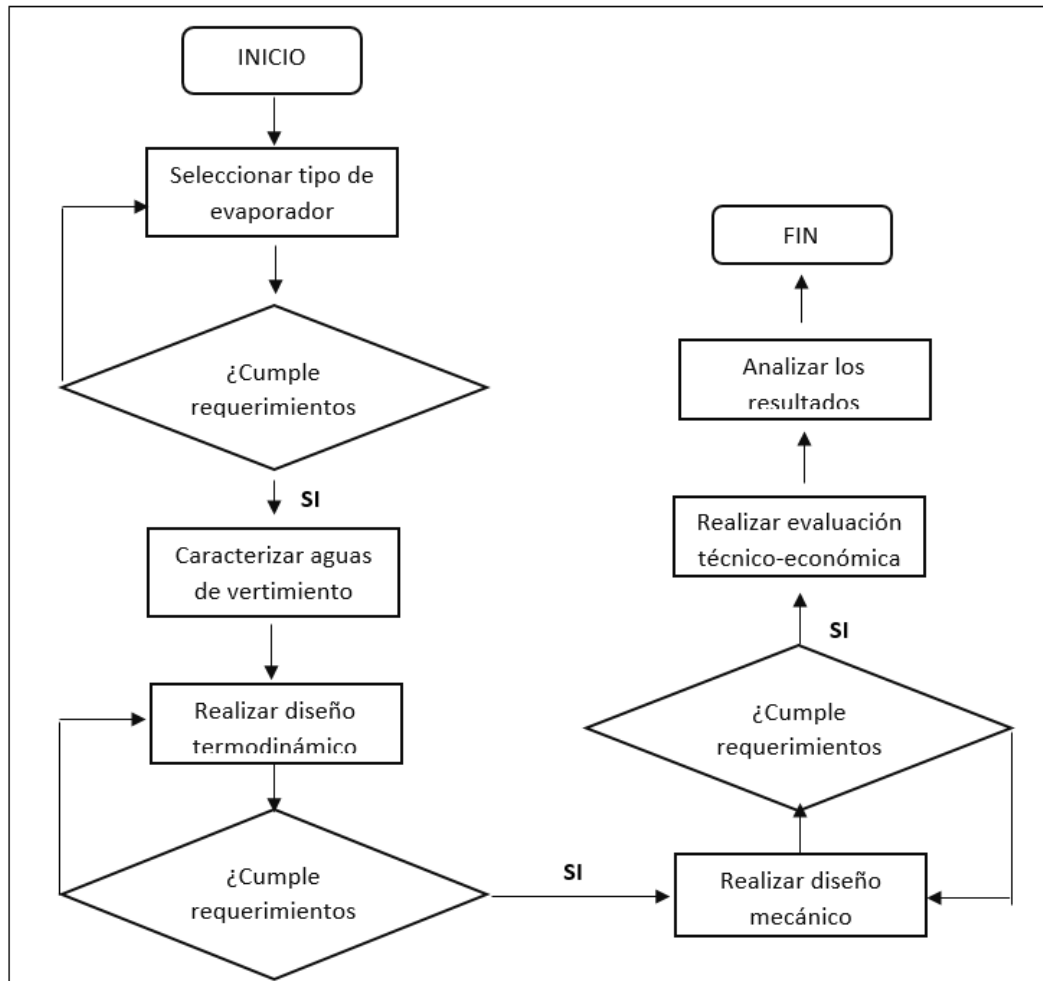


Fuente: UNIVERSIDAD DE SEVILLA, Arquitectura e Ingeniería: Operaciones básicas / Tema 10. Evaporación [en línea]. s.f. p. 6. [consultado 04 de Mayo de 2018]. Disponible en Internet: http://ocwus.us.es/arquitectura-e-ingenieria/operaciones-basicas/contenidos1/tema10/pagina_06.htm

3. METODOLOGÍA

La presente investigación fue desarrollada en las instalaciones de la planta de generación termoeléctrica Termopaipa IV, durante la realización de la práctica industrial desarrollada por el autor, para diseñar el evaporador piloto para la recuperación de efluentes para el uso del sistema de refrigeración del condensador que tiene la Compañía Eléctrica de Sochagota – CES S.A., para lo cual fue necesario realizar el trabajo en varias etapas, como se observan en el siguiente diagrama.

Figura 6. Diagrama de flujo metodología



Fuente: Elaboración propia

Dado que el sistema de evaporación está compuesto de cuatro etapas principales como lo muestra el flujograma, a continuación se relacionan los diferentes pasos ejecutados para cumplir con los objetivos trazados en este estudio de investigación:

1. Para el diseño de la cámara de evaporación, se procedió a **seleccionar el tipo de evaporador**, posteriormente se realizó la caracterización de las aguas de vertimiento, precisando que los vertimientos de aguas son de índole industrial, por lo tanto, estos vertimientos se producen en cada una de las partes del proceso de energía. Dicha **caracterización del agua de vertimiento** relaciona las condiciones de las aguas de vertimiento en el tanque drenaje caldera, en Purga continua caldera, en la torre de enfriamiento, en el Sótano de turbina, en tanque drenaje turbina, Neutralización y Precaution Plant. Con la implementación del evaporador permite tratar el agua de vertimiento adecuándola a las características necesarias para el agua de refrigeración, permitiendo disminuir al máximo la conductividad, tener un pH lo más cercano a neutro, disminuir la cantidad de cloruros, fosfatos, nitratos, así como reducir en lo posible la cantidad de minerales en general.

2. Se realizan los cálculos necesarios para el diseño de la cámara de evaporación, como es determinar el diámetro del tubo central, el diseño mecánico de carcasa, espejos y tapa y finalmente el diseño mecánico de tubos.

3. Para el diseño del cuerpo del evaporador se selecciona el tipo de evaporador a utilizar el cual es de tipo calandria o vertical de tubos cortos, que cumple los requerimientos definidos y se generan los cálculos del condensador, teniendo en cuenta el vapor de agua y agua de enfriamiento en la entrada, el agua de reciclo y el agua caliente en la salida del condensador. El condensador se usa para hacer el cambio de fase de gas a líquido del agua ya tratada.

4. Se establecen las características técnicas de la bomba de vacío que tiene CES S.A., la cual permitirá la evaporación y condensación del agua tratada.

5. En el diseño termodinámico de la cámara de evaporación se aplicaron las ecuaciones de Caudal, Balance de Masa, Balance de energía, Balance de Solute y Cantidad de calor a transmitir y recibir, que se encuentran en la Tabla 5. Diseño termodinámico cámara de evaporación

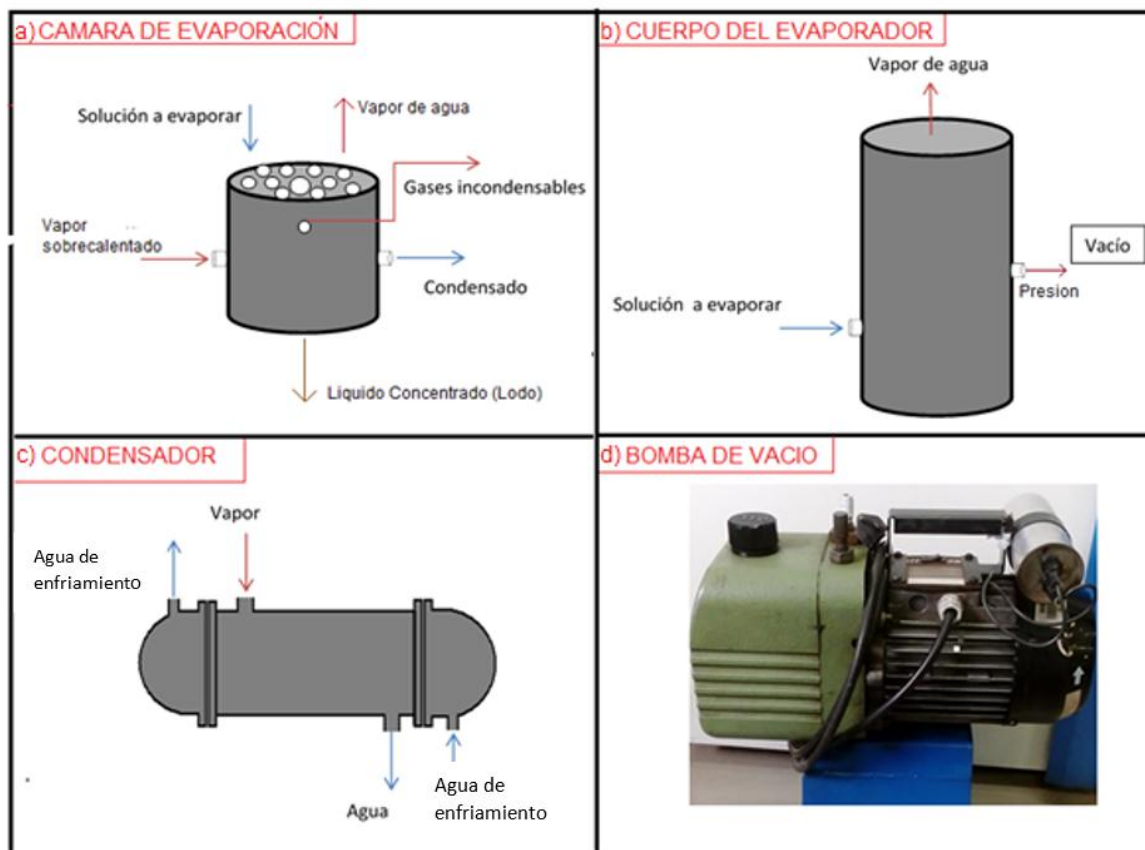
6. Finalmente se realiza el análisis económico que permite comparar los costos y gastos, con el fin de establecer las condiciones actuales y aquellas que han tenido cambios significativos. Debido a la poca información de los recursos existentes en CES S.A., para la evaluación económica se harán algunos planteamientos o suposiciones preliminares en cuanto a costos de equipos, Mano de obra, servicios industriales, materia prima, residuos, entre otros, siempre buscando que los gastos operativos y los que impliquen algún tipo de inversión disminuyan. La etapa de evaluación técnico-económica, consiste en hacer un análisis económico a los caudales de fluidos, a los costos operativos, al costo del evaporador y condensador, de tal manera que dichos valores numéricos se tengan en cuenta para generar el cálculo de los costos de instalación y operación evaporador y condensador, comparando dichas cifras con los actuales de captación de agua, de vertimiento y otros costos.

7. Finalmente se analizan los resultados obtenidos del diseño de la cámara de evaporación, el dimensionamiento de la cámara de evaporación y las especificaciones del condensador desde el punto de vista termodinámico.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El sistema de evaporación propuesto está compuesto en cuatro etapas, tal como se observa en la siguiente figura. La **cámara de evaporación** (calandria), encargada de realizar la evaporación de la solución, el **cuerpo del evaporador**, se debe contemplar que la altura del evaporador evitará que haya arrastre de gotas, de tal forma que el vapor solo pasará por el condensador. El **condensador**, se usa para hacer el cambio de fase de gas a líquido del agua ya tratada y finalmente la **bomba de vacío**, facilita la evaporación y condensación.

Figura 7. Esquema de las etapas que componen el evaporador



Fuente: Elaboración propia

Para evaluar el proceso de evaporación a escala piloto para la recuperación de los vertimientos acuosos de la CES S.A que permita el reúso de los mismos en la torre de enfriamiento, se hace necesario descomponer cada una de las etapas mencionadas que componen el evaporador.

4.1 CÁMARA DE EVAPORACIÓN

4.1.1 Selección del tipo de evaporador Basados en la información de la Tabla 1. Tipos de evaporadores, se procedió a comparar las ventajas, desventajas, posibles aplicaciones de cada tipo de evaporador; además de considerar aspectos importantes como son; la solución a tratar, transferencia de calor, fácil limpieza, economía y el caudal de diseño del equipo (estimado por el supervisor a cargo del proyecto en 100 litros normales/h), el tipo de evaporador que mejor se ajusta a las necesidades de la empresa CES S.A. es el calandria o vertical de tubos cortos, debido a que este tipo de evaporador tiene una amplia y eficaz aplicación en la operación de la termoeléctrica; la limpieza del equipo no es complicada dado que la cantidad de los sólidos y sales disueltas no es muy grande, el mantenimiento es mínimo y es posible hacerle unas pequeñas modificaciones para adaptarlo a las exigencias de calidad de agua a producir, así como al rendimiento requerido por la compañía. Dicha recomendación la hace el jefe del departamento químico de la CES S.A.

4.1.2 Caracterización del agua de vertimiento Debido al caudal de las aguas de vertimiento y a sus características fisicoquímicas, los principales efluentes de la planta que serán tenidos en cuenta para su reúso son: la purga en la torre de enfriamiento, los drenajes de caldera, el drenaje de la turbina, el sótano de turbina, la purga continua desde la caldera y los residuos de diferentes procesos en la producción de agua desmineralizada.

El sistema de evaporación permitirá que las condiciones del agua de vertimiento que muestra la tabla 2, en la columna precaution plant tengan las características que debe tener el agua de reposición para torre de enfriamiento que tiene la tabla 3. Es necesario mencionar que las condiciones del agua son las de la precaution plant, debido a que en esta planta es donde llegan todos los desechos o vertimientos de CEN S.A.

Tabla 2. Características del agua de vertimiento

ANÁLISIS	UNIDADES	Tanque drenaje caldera	Purga continua caldera	Torre de enfriamiento	Sótano de turbina	Tanque drenaje turbina	Neutralización	Precaution Plant
Temperatura	°C	21,30	21,10	23,20	23,00	24,40	17,10	30,50
pH	Unidades	7,05	9,01	8,58	8,59	7,96	11,56	8,11
Conductividad	ms/cm	132,00	10,30	1315,00	1302,00	348,00	6550,00	1266,17
Color	Unidades Pt-Co	20,31	11,91	90,74	88,61	26,03	7,00	129,00
Sólidos totales	mg/l	50,00	59,40	602,00	618,00	159,00	2883,00	732,33
Sólidos en suspensión	mg/l	3,00		13,00	11,00	2,00	2,00	14,58
Alcalinidad M	mg/l de CaCO ₃	41,88	30,69	144,36	162,51	58,78	165,21	126,00
Dureza total	mg/l de CaCO ₃	38,14		185,60	351,01	90,24	100,60	202,00
Fosfatos	mg/l de PO ₄	0,59	1,38	2,47	2,52	0,45	0,48	2,70
Cloruros	mg/l de Cl ⁻	185,27	2,59	211,47	191,91	56,80	1691,41	27,00
Cobre	mg/l de Cu ₂	0,00	0,00	9,11	0,00	0,00	0,00	22,75
Sílice	mg/l de SiO ₂	3,75	0,85	37,71	27,01	8,98	3,56	25,00
Demanda Química de Oxígeno	mg/l de DQO	36,00	241,00		19,00	25,00		41,00
Manganeso	mg/l de Mn	0,05	0,02	0,28	0,29	0,07	0,09	0,30
Dureza Ca	mg/l de CaCO ₃	29,84		147,50	286,02	73,74	25,00	88,00
Dureza Mg	mg/l de CaCO ₃	8,30		38,10	64,99	16,50	75,60	24,00

Fuente: Laboratorio de caracterización de aguas. CES S.A. 2016.

4.1.3 Caracterización de los efluentes Se propuso la caracterización de cada una de las consideradas para el reúso, así como el agua que tiene como destino final el río y que debe ser tratada; implementando el evaporador para realizar las características del agua de vertimiento a las características necesarias para el agua de refrigeración.

La tabla 2. características del agua de vertimientos, muestra los resultados obtenidos después de caracterizar cada una de las corrientes que van a ser consideradas para su reúso, así como el agua que tiene como destino final el río y que debe ser tratada, la cual se encuentra caracterizada en la columna denominada "*PRECAUTION PLANT*". Lo que se pretende con la implementación del evaporador es llevar las características del agua de vertimiento a las características necesarias para el agua de refrigeración, las cuales se describen en la Tabla 3. Características agua de reposición para torre de enfriamiento

Con los datos tomados de las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo en la entrada y la salida de la torre de enfriamiento, se pudieron determinar todas las propiedades del agua y aire en las corridas utilizando la carta psicométrica (Anexo A.), para después calcular el coeficiente global de transferencia de masa ($K_y a$) y otros cálculos de desempeño de la torre como el calor retirado, masa de agua evaporada y la eficiencia. (Anexo B. Balance de energía para el cálculo del caudal – Ecuación (4))

4.1.4 Características del agua necesaria para la refrigeración Las principales características que son indispensables en el agua de enfriamiento, y que deben ser tenidas en cuenta para poder reutilizar estas aguas de vertimiento, son: disminuir al máximo la conductividad, tener un pH lo más cercano a neutro, disminuir la cantidad de cloruros, fosfatos, nitratos, así como reducir en lo posible la cantidad de minerales en general. La siguiente tabla muestra las características del agua de enfriamiento que utiliza la torre de enfriamiento, por lo que cualquier efluente a ser reutilizada debe cumplir como mínimo con dichas características.

Tabla 3. Características agua de reposición para torre de enfriamiento

ANALISIS	UNIDADES	Agua de ingreso a torre
Caudal	m ³ /h	315
Temperatura	°C	19,5
pH	Unidades	7,61
Conductividad	ms/cm	119
Color	Unidades Pt-Co	1
Sólidos totales	mg/l	9,6
Sólidos en suspensión	mg/l	4
Alcalinidad M	mg/l de CaCO ₃	16,71
Dureza total	mg/l de CaCO ₃	54,56
Fosfatos	mg/l de PO ₄	2,37
Cloruros	mg/l de Cl ⁻	16,32
Sulfatos	mg/l de SO ₄	27,5
Cobre	mg/l de Cu ₂	3,73
Sílice	mg/l de SiO ₂	13,94
Demanda Química de Oxígeno	mg/l de DQO	27
Manganeso	mg/l de Mn	0,013
Dureza Ca	mg/l de CaCO ₃	41,6
Dureza Mg	mg/l de CaCO ₃	12,96

Fuente: CES S.A. Laboratorio de caracterización de aguas. 2016

4.1.5 Diseño de la cámara de evaporación Para diseñar la cámara de evaporación se tuvo en cuenta el esquema del evaporador de circulación forzada, adicional a esto se dispone de las características de agua de reposición para torre de enfriamiento, como es: la Temperatura, Ph, conductividad, color, sólidos totales, sólidos en suspensión, Alcalinidad M, Dureza total, Fosfatos, Cloruros, Cobre, Sílice, Demanda Química de Oxígeno, Manganeso, Dureza Ca, Dureza Mg. En el diseño termodinámico se aplicaron las ecuaciones de Caudal, Balance de Masa, Balance de energía, Balance de Solute y Cantidad de calor a transmitir y recibir, que se encuentran en la Tabla 5. Diseño termodinámico cámara de evaporación.

Tabla 4. Datos para el diseño de la cámara de evaporación

Datos	Nombre	Símbolo	Concentración		Flujo de masa [kg/h]	(T) [°C]	(P) [bar]	Entalpia (h,H) [kJ/kg]
			X _{H₂O} [fracción]	X _{sto} [fracción]				
Entrada	Solución por evaporar	F	0,99926	0,00074	\dot{m}_f	30,5	1	125,79
	Vapor sobre calentado	V	1	-	\dot{m}_v	120	2	2706,7
Salida	Vapor de agua	E	X _{H₂O} ^E	X _{sto} ^E	\dot{m}_e	6,97	0,01	2513,7
	Lodo	S	X _{H₂O} ^s	X _{sto} ^s	\dot{m}_s	6,97	0,01	29,264
	Conden-sado	C	1	-	\dot{m}_l	T _c	P _c	h _c

Fuente: Elaboración propia

Los valores de presión del vapor de agua y entalpía presentados fueron extraídos de Himmelblau (1997). Además, la presión de salida en la corriente E se fijó en 0,01 bar, teniendo en cuenta que se dispone de una bomba de vacío que permitirá dichas condiciones de operación. Posteriormente, se procedió a realizar el diseño termodinámico de esta etapa del evaporador, como se resume en la tabla 5.

EL diseño termodinámico de cámara de evaporación tiene las siguientes aclaraciones:

a) Densidad del agua a las condiciones de entrada.

- b) El caudal medio de aguas de vertimiento en la empresa oscila entre 40 y 70 m³/h, el evaporador a diseñar es una fase piloto, y su caudal se fijó en 100 L/h.
- c) Valor promedio de la eficiencia hallada experimentalmente en investigación análoga⁹, la cual es de un 70%. (Anexo B. Balance de energía para el cálculo del caudal – Ecuación (4))
- d) Tomado de Brown (1965).
- e) Tomado de ¹⁰
- g) Se establece el valor de 750 de acuerdo con el rango mostrado por Warren L. McCabe J. C., (2003).

Tabla 5. Diseño termodinámico cámara de evaporación

⁹ BASANTES M.F., MONTESDEOCA P. N., SANTOS T. M.,” Diseño, construcción y puesta en marcha de un evaporador de simple efecto de tubos verticales cortos”, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2014.

¹⁰ Warren L. McCabe, OPERACIONES UNITARIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA, 2007, págs. 526-528.

ECUACIONES NECESARIAS		Variables conocidas	Variables que hallar	Datos adicionales
Nombre	Ecuación			
<i>Método: Por medio de la ecuación (1) se halla \dot{m}_e.</i>				
Caudal (1)	$Q_e = \dot{m}_e / \rho_e$		\dot{m}_e	$\rho = 995,41 \text{ kg/m}^3$ (a) $Q_e = 0,1 \text{ m}^3/\text{h}$ (b)
<i>Método: Para conocer el valor de \dot{m}_f y \dot{m}_s es necesario recurrir tanto al balance de masa como al balance de energía.</i>				
Balance de masa (2)	$\dot{m}_f + \dot{m}_v = \dot{m}_s + \dot{m}_e + \dot{m}_c$	\dot{m}_e	\dot{m}_s, \dot{m}_f	$\dot{m}_v = \dot{m}_c$
<i>Método: Al resolver simultáneamente las ecuaciones (2) y (3) se obtiene el valor de \dot{m}_s y \dot{m}_e; con la relación de eficiencia se halla \dot{m}_v que es necesario para conocer \dot{m}_f y \dot{m}_s al reemplazar en (2)</i>				
Balance de energía (3)	$\dot{m}_v \cdot H_v + \dot{m}_f \cdot h_f = \dot{m}_s \cdot h_s + \dot{m}_e \cdot h_e$	\dot{m}_e	\dot{m}_s, \dot{m}_f	h_e, h_s, h_f, H_v $\dot{m}_v / \dot{m}_e = 0,7$ (c)
<i>Método: Gracias al balance de soluto se puede conocer el valor de la concentración del lodo resultante asumiendo que en el lodo se queda toda la concentración inicial de sólidos ($X_{sto}^E = 0$).</i>				
Balance Sto (4)	$\dot{m}_f \cdot X_{sto}^F = \dot{m}_s \cdot X_{sto}^S + \dot{m}_e \cdot X_{sto}^E$	$\dot{m}_f, \dot{m}_s, \dot{m}_d, X_{sto}^F$	X_{sto}^S	$X_{sto}^E = 0$
<i>Método: Para hallar la cantidad de calor necesaria para realizar la evaporación se recurre a la ecuación (5), al conocer C_{pF} y λ_v que son propios de la solución a evaporar simplemente se reemplaza y se obtiene un valor q.</i>				
Cantidad de calor a transmitir/ recibir (5)	$q = \dot{m}_F \cdot C_{pF} (T_v - T_F) + (\dot{m}_F - \dot{m}_S) \lambda_v$	$\dot{m}_F, \dot{m}_S, T_v, T_F, \lambda_v, C_{pF}$	Q	$C_{pF} = 4,178 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ (e) $\lambda_v = 2382 \text{ kJ}/\text{kg}$ (f)
<i>Método: Gracias a la ecuación 6, la cual relaciona la q con ΔT y hallando U se obtiene el área de transferencia de calor (A)</i>				
Cantidad de calor a transmitir/ recibir	$q = A \cdot (U \cdot \Delta T)$ (6)	$q, \Delta T$	A	U (g)

Fuente: Elaboración propia

Una vez concluido el diseño termodinámico, se procedió a realizar el diseño mecánico de la cámara de evaporación, el cual se presenta en la tabla 6. Diseño mecánico de tubos y tabla 10. Diseño de la cámara de evaporación desde el punto de vista termodinámico

El material de construcción (MOC) a utilizar para este arreglo de tubos normalmente es una aleación de acero inoxidable, según las características del

líquido a tratar. El material se elige de acuerdo con las normas ASTM y AISI. Para este caso en específico, el material a utilizar será acero inoxidable 316 y el del tubo central será acero 316L, teniendo en cuenta que “es un acero inoxidable de cromo, níquel, austenítico que contiene molibdeno”¹¹.

Esta adición aumenta la resistencia a la corrosión general, mejora la resistencia a picaduras de soluciones de iones de cloruro y proporciona mayor resistencia a temperaturas elevadas. Las propiedades son similares a las del tipo 304, excepto que esta aleación es un poco más sólida a temperaturas elevadas. La resistencia a la corrosión es mejor, particularmente contra ácidos sulfúrico, hidrociorhídrico, acético, fórmico y tartárico; sulfatos ácidos y cloruros alcalinos. El acero inoxidable del Tipo 316L es una versión de carbón extra bajo del Tipo 316 que minimiza la precipitación de carburos perjudiciales en la zona afectada por el calor durante la soldadura”¹².

4.1.6 Cálculo del Diámetro del tubo central Para poder hallar el diámetro del tubo central es necesario conocer el área transversal de la totalidad de los tubos pequeños (AP). Para llegar a esto se utiliza la ecuación (8) para hallar el área transversal de uno de los tubos pequeños (AC1P),

$$A_{C1P} = \pi * r_{1P}^2 \quad (8)$$

r1P=Radio de uno de los tubos pequeños= 1,6 cm

$$A_{C1P} = \pi * (1,6 \text{ cm})^2 = 8,04 \text{ cm}^2$$

Luego este valor se multiplica por la cantidad de tubos pequeños para obtener AP

$$A_P = A_{C1P} * n = 8,04 \text{ cm}^2 * 18 = 265,402 \text{ cm}^2$$

¹¹ BONNET. Clasificación de los Aceros Inoxidables. s.f. Disponible en Internet: <http://www.bonnet.es/clasificacionacerinox.pdf>

¹² TECNOCOMMERZ Europa. s.f. Disponible en Internet: <http://tecnoconmerz.com/>

El área transversal del tubo central (ATc) puede ser entre 25 y 40% del área transversal de la totalidad de los tubos pequeños (AP), se elige que nuestro tubo central sea del 30 % de AP.

$$A_{Tc} = A_P * 0,3 = 265,402 \text{ cm}^2 * 0,3$$

$$A_{Tc} = 79,62 \text{ cm}^2$$

Para hallar el diámetro del tubo central (DTc) nuevamente acudimos a la ecuación (8), despejando el diámetro haciendo una pequeña modificación:

$$D_{Tc} = 2 \sqrt{\frac{A_{Tc}}{\pi}} = 2 \sqrt{\frac{79,62 \text{ cm}^2}{\pi}}$$

$$D_{Tc} = 10,068 \text{ cm} = 3,964 \text{ pulg}$$

4.1.6. Diseño mecánico de carcasa, espejos y tapa La carcasa es la parte de la cámara de evaporación donde circula el vapor sobrecalentado que entrega el calor necesario para que se produzca el cambio de fase. Básicamente es una lámina soldada en forma de cilindro, a este cilindro se le hacen tres orificios; uno para la entrada del vapor sobrecalentado, otro para la salida del agua caliente y el tercer orificio será para extraer los gases incondensables que se produzcan en el proceso. El diámetro de la carcasa será determinado haciendo uso del software elegido para el diseño (como Solid Works) el cual, al hacer la acomodación de los tubos con las características encontradas, arrojará un valor de diámetro de carcasa. La longitud de la carcasa es la misma elegida para los tubos. Se definirá el espesor de la carcasa teniendo en cuenta la eficiencia del proceso, una mayor durabilidad, además de economía y disponibilidad en el mercado local.

En los dos espejos, los tubos que forman la calandria entran a presión y se sueldan, de manera que no existan fugas, y de este modo un tubo puede ser cambiado, sin afectar a los demás. Los espejos van a tener una pestaña circular la cual va cumplir la función de brida para hacer el acople tanto con el cuerpo del evaporador como con la tapa inferior. El diámetro de los espejos va a ser el mismo que el de la carcasa. El espesor de los espejos va a ser igual al de la carcasa.

4.1.7 Diseño mecánico de tubos En el diseño mecánico de tubos se tuvieron en cuenta tubos pequeños y un tubo central, con algunas características puntuales en cuanto a Diámetro, Longitud, Espesor, cantidad necesaria y distancia entre los tubos, registrando dicha información en la siguiente tabla. El Anexo C. muestra el cálculo para determinar el número de tubos.

Tabla 6. Diseño mecánico de tubos

Pieza	Diámetro	Longitud	Espesor	Cantidad Necesaria	Distancia entre tubos
Tubos Pequeños	2,5 a 7,5 cm	0,5 a 2 m	Dependiendo del material de construcción elegido, se opta por escoger un espesor mediante el cual el intercambio de calor se realice de forma más eficiente.	$n = A / (\pi * D_0 * L)$ (7) Por medio de la ecuación (7) la cual relaciona el área de transferencia de calor (A) con el diámetro y la longitud elegidos de los tubos se obtiene la cantidad de tubos necesaria.	En la geometría de los tubos, el pinch (P) es la distancia entre dos tubos mínima permitida, desde el centro de uno hasta el centro del otro. Para el arreglo de tubos del presente trabajo se decide que el pinch va a ser 1,5 veces el diámetro de los tubos.
Tubo central	$A_c = \pi * r^2$ (8)	El tubo central va a tener la misma longitud que la elegida para los tubos pequeños.	El espesor del tubo central va a ser igual al elegido para los tubos pequeños.	1	La distancia entre el tubo central y los tubos pequeños va a estar dada por la acomodación final de estos.

Fuente: Elaboración propia

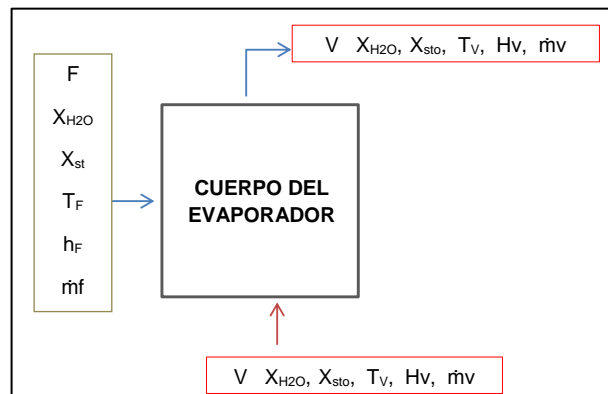
Se consideró en este diseño tener accesorios y conexiones con material HASTELLOY C-276, teniendo en cuenta que es una aleación de níquel-molibdeno-cromo-hierro-tungsteno¹³, el cual está diseñado para tener una excelente resistencia a la corrosión en un rango amplio de ambientes severos.

4.2 CUERPO DEL EVAPORADOR

En el diseño del cuerpo del evaporador se contempló el evaporador de tubo horizontal, y los datos del condensador que se encuentran en la tabla 7, contemplando el vapor de agua y agua de enfriamiento en la entrada y el agua de reciclo y caliente en la salida del condensador.

¹³ CHILEXPO, Ficha Técnica HASTELLOY C-276. p.1

Figura 8. Esquema del cuerpo del evaporador



Fuente: Elaboración propia

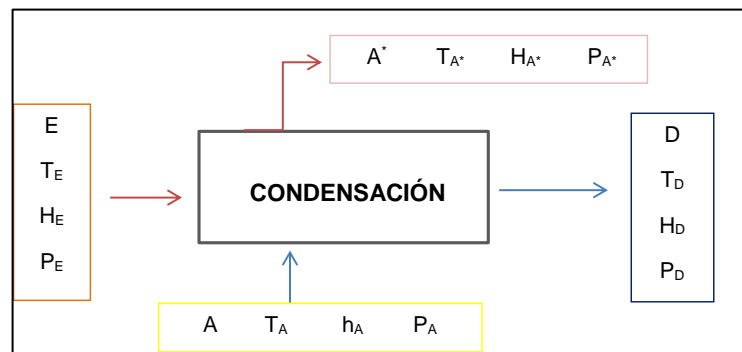
El diseño del cuerpo del evaporador se define con base a la figura 8 que contiene el esquema, donde por el evaporador se da el ingreso de F, la boquilla tiene que estar ubicada a una altura no muy grande para así evitar el arrastre de gotas hacia el condensador. Los resultados obtenidos después de realizar el diseño mecánico establecen que la longitud debe ser de 1 metro y el espesor de 6 mm, el diámetro del cuerpo del evaporador de 0,38 metros, siendo el mismo que el de la cámara de evaporación y este se da como parte de la acomodación espacial de los tubos teniendo en cuenta la heurística en intercambiadores de calor. En cuanto a la altura de la cámara de evaporación es de 1,5 a 2 veces la altura de los tubos de la cámara de calefacción por Basantes, Montesdeoca y Santos¹⁴. Respecto al espesor se escoge según catálogos de empresas locales de distribución de láminas de acero, escogiendo la de 6 mm. La tapa superior del evaporador es la que ayuda a hacer conexión entre el cuerpo del evaporador y el condensador. El diámetro debe ser el mismo que el del cuerpo del evaporador pues debe quedar hermético para que no existan fugas de vapor. La longitud debe ser de 1 metro.

¹⁴ BASANTES M.F., MONTESDEOCA P. N. y SANTOS T. M. Diseño, construcción y puesta en marcha de un evaporador de simple efecto de tubos verticales cortos. Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2014.

4.3 CONDENSADOR

En la siguiente figura se encuentra el esquema empleado del condensador utilizado y la tabla 7 muestra las especificaciones del condensador. Se hace necesario mencionar que se asume condensación completa, por lo que los flujos másicos de entrada serán iguales a los flujos másicos de salida. Asimismo, las condiciones de entrada del agua de enfriamiento se definieron como las condiciones ambientales del municipio de Paipa Boyacá, mientras que la condición de salida del agua de enfriamiento será la misma presión ambiente, es decir, la operación del flujo de agua de enfriamiento será isobárico.

Figura 9. Esquema del condensador



Fuente: Elaboración propia

La tabla 7 muestra las especificaciones preliminares del condensador usadas para el diseño de la cámara de evaporación de manera análoga y los resultados obtenidos del diseño termodinámico del condensador se muestran en la tabla 11. El diseño mecánico no se realizó, teniendo en cuenta que su longitud y espesor deben ser iguales a los del cuerpo del evaporador.

Tabla 7. Datos de entrada y salida del condensador

Descripción		Símbolo	Flujo de masa [kg/h]	(T) [°C]	(P) [bar]	Entalpia (h,H) [kJ/kg]
Entrada	Vapor de agua	E	\dot{m}_e	6,97	0,01	2513,7
	Agua de enfriamiento	A	\dot{m}_a	13	0,75	54,6
Salida	Agua de reciclo	D	\dot{m}_d	19,5	0,75	81,86
	Agua caliente	A*	\dot{m}_{a^*}	30	0,75	209,34

Fuente: Elaboración propia

4.4 BOMBA DE VACÍO

La bomba de vacío que tiene la compañía fue fabricada por J.P. Selecta S.A. ®, con las siguientes características técnicas, considerándose que su diseño no se realizó, sino que se dispuso de la bomba de vacío adquirida por la compañía y que permite la obtención de un vacío mayor a 1 bar.

Tabla 8. Características técnicas de la bomba de vacío

Caudal nominal [m³/h]	6	
Vacío límite Mc-Leod [Mbar]	5, 10 ⁻²	
Medidas exteriores [cm]	Alto	24
	Ancho	35
	Fondo	17
r.p.m	1.450	
Potencia [HP]	1/3	
Peso [kg]	13	

Fuente: Compañía CES S.A. Manual de operación bomba de vacío. 2004.

4.5 RESULTADOS DEL DISEÑO DEL EVAPORADOR

Todos los cálculos de los anexos que se relacionan a continuación fueron necesarios para el diseño del sistema de evaporación, compuesto por la cámara de evaporación, del cuerpo del evaporador, el condensador y la bomba de vacío, dando como resultados los valores numéricos que muestra la tabla 10. Diseño de

la cámara de evaporación desde el punto de vista termodinámico y tabla 3. Características agua de reposición para torre de enfriamiento.

Anexo B. Balance de energía para el cálculo del caudal

Anexo C. Numero de tubos para el cálculo del caudal

Anexo D. Balance de masa para el condensador

Anexo E. Cálculo del caudal

Anexo F. Balance de masa para el cálculo del caudal

Anexo G. Cantidad necesaria de calor para el cálculo del caudal

Anexo H. Área de intercambio de calor para el cálculo del caudal

Anexo I. Balance de energía para el condensador

En la cámara de evaporación instantánea entra agua a alta temperatura y presión que se extrae de debajo de la superficie, donde la disminución de la presión a medida que el fluido sobrecalentado sube por los tubos provoca que el agua líquida se convierta en vapor. El vapor de agua saturado se utiliza para alimentar el conjunto de la turbina-generador para posteriormente producir energía eléctrica y el líquido saturado que queda es regresado al lugar de donde fue extraída.

Tabla 9. Dimensionamiento de la cámara de evaporación

Pieza	Diámetro (m)	Longitud (m)	Cantidad necesaria	Distancia entre tubos (m)	Espesor (mm)
Tubos pequeños	0,032	0,5	33	0,048	1.65
Tubo central	0,1	0,5	1	-	3
Carcasa	0,54	0,5	-	-	6
Espejos	0,54	-	-	-	6
Tapa Inferior	0,54	-	-	-	6

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10. Diseño de la cámara de evaporación desde el punto de vista termodinámico

PARÁMETRO	SÍMBOLO	UNIDAD	CANTIDAD
Flujo másico total de alimentación	\dot{m}_f	kg/h	99,541
Temperatura en la alimentación	T_f	°C	30,5
Presión en la alimentación	P_f	Bar	1
Entalpia alimentación	h_f	kJ/kg	125,79
Flujo de descarga del fondo	\dot{m}_s	kg/h	0,074
Temperatura de fondo	T_s	°C	6,9696
Presión de fondo	P_s	Bar	1
Entalpia de fondo	h_s	kJ/kg	29,264
Flujo de vapor tratado	\dot{m}_e	kg/h	99,467
Temperatura vapor tratado	T_e	°C	6,9696
Presión vapor tratado	P_e	Bar	0,01
Entalpia vapor tratado	h_e	kJ/kg	2513,7
Cantidad de vapor de calentamiento necesaria	\dot{m}_v	kg/h	142,09
Temperatura vapor de calentamiento	T_v	°C	120
Presión vapor de calentamiento	P_v	Bar	2
Entalpia vapor de calentamiento	h_v	kJ/kg	2706,7
Concentración de soluto de entrada	X_{sto}^F	-	0,00074
Concentración de soluto en el vapor	X_{sto}^D	-	0
Concentración de soluto en el líquido del fondo	X_{sto}^S	-	1
Cantidad necesaria de calor	Q	kJ/h	250030,2
Coeficiente global de transferencia de calor	U	kJ/(m ² *°K*h)	6790,84
Área de transferencia de calor	A	m ²	1,565

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11. Especificaciones del condensador desde el punto de vista termodinámico

PARÁMETRO	SÍMBOLO	UNIDAD	CANTIDAD
Flujo de vapor entrada	\dot{m}_e	kg/h	99,467
Temperatura vapor entrada	T_e	°C	6,9696
Presión vapor entrada	P_e	Bar	0,01
Entalpia vapor entrada	h_e	kJ/kg	2513,7
Flujo másico total de alimentación	\dot{m}_a	kg/h	2141,93
Temperatura en la alimentación	T_a	°C	13
Presión en la alimentación	P_a	Bar	0,75
Entalpia alimentación	h_a	kJ/kg	54,6
Flujo de descarga de refrigeración	\dot{m}_{a^*}	kg/h	2141,93
Temperatura de descarga de refrigeración	T_{a^*}	°C	30
Presión de descarga de refrigeración	P_{a^*}	Bar	0,75
Entalpia de descarga de refrigeración	H_{a^*}	kJ/kg	209,34
Flujo de agua de reciclo	\dot{m}_d	kg/h	99,467
Temperatura agua de reciclo	T_d	°C	19,5
Presión agua de reciclo	P_d	Bar	0,75
Entalpia agua de reciclo	h_d	kJ/kg	81,86
Caudal de agua de reciclo	q_d	L/h	99,6274

Fuente: elaboración propia, con base a los cálculos de los anexos y desarrollo del diseño del evaporador

Con base a los datos de la tabla 7 muestra las especificaciones preliminares del condensador usadas para el diseño de la cámara de evaporación de manera análoga y los resultados obtenidos del condensador desde el punto de vista termodinámico que se muestran en la tabla 11 y con los diseños realizados, se establece que es posible reutilizar 99,6274 L/h de los 100 L/h que se toman para ser tratados con la evaporación. (Ver tabla 11. Especificaciones del condensador desde el punto de vista termodinámico - *caudal de agua de reciclo* y Anexo D. Balance de masa para el condensador).

Lo anterior indica que la implementación del evaporador piloto y su respectivo condensador diseñados para la compañía eléctrica Sochagota permitirán el aprovechamiento del 99,6% del caudal de agua definido para reciclo en la torre de enfriamiento (100 L/h), permitiendo así la eliminación de vertimientos de aguas industriales al Río Chicamocha. (Ver tabla 11. Especificaciones del condensador desde el punto de vista termodinámico - *caudal de agua de reciclo* y calculado en el Anexo D. Balance de masa para el condensador)

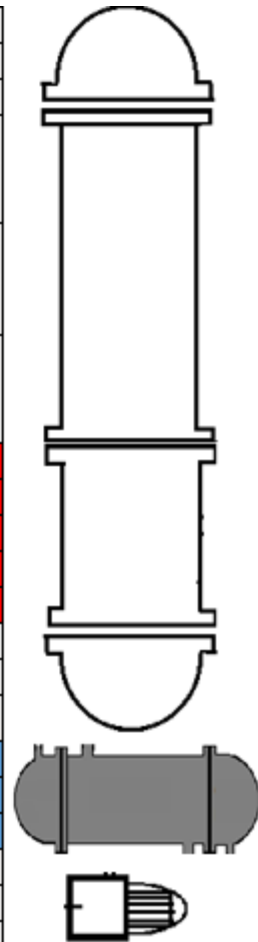
La mezcla líquido-vapor se separa en una arqueta de separación contigua al cuerpo de vaporización. Por un lado, se recoge el vapor secundario (también llamado vahos de vapor) y, por otro, líquido concentrado. Por lo general, se recupera la energía contenida en los vahos de vapor para recalentar el producto entrante o para calentar un segundo cuerpo de evaporación. Es el fundamento de la evaporación de efecto múltiple¹⁵. Los vahos del último cuerpo van a un condensador, que puede ser de mezcla o de superficie.

Se escogió el control en cascada inferencial para las perturbaciones y para el seguimiento del punto de ajuste. El rendimiento de este sistema de control fue muy satisfactorio y mucho mejor que el control convencional. Esta estructura de control combinó las ventajas de la cascada el control y el control inferencial tiene como principales beneficios mejorar el rendimiento del control, el bajo costo de los sensores (mediante estimador LKF en lugar de utilizar sensores TSC), disminuir el tiempo respuesta en lazo de control, rechazo de perturbaciones favorables y la estimación exacta de los estados inconmensurable en el proceso.

Joel, R., "Basic Engineering Thermodynamics in SI Units", 1971.P 82-137. Fundamentos de la evaporación de efecto múltiple.

Tabla 12. Resumen de dimensiones sistema de evaporación.

Tapa superior				
diametro (m)	longitud (m)	grosor(mm)		
0,54	0,1	6		
Cuerpo del evaporador				
diametro (m)	longitud (m)	grosor(mm)		
0,54	1	6		
Camara de evaporacion				
	diametro(m)	longitud(m)	grosor(mm)	cantidad
Tubos pequeños	0,032	0,5	1,65	33
Tubo central	0,1	0,5	3	1
Carcasa	0,54	0,5	6	1
Tapa superior				
diametro	longitud	grosor		
0,54	0,1	6		
Condensador				
Largo		Diametro		
0,5		0,2		
Bomba de vacio				
Largo	ancho	alto		
0,35	0,15	0,15		



Fuente: Elaboración propia.

4.6 Análisis económico

El análisis económico realizado se basó en una comparación entre los costos que representan 2 escenarios evaluados a 5 años, empezando el primero de enero de 2018. El escenario 1, supone continuar operando como lo hace actualmente la compañía CES S.A., es decir, reemplazando el volumen de agua que se pierde en las torres de enfriamiento por agua de captación del río, y realizando el desecho al Río Chicamocha de la totalidad del volumen de aguas de vertimiento, acarreado los costos de tratamiento para poderlo realizar y el pago de compensaciones ambientales cuando hay lugar a ellas (Ver Anexo J. Costos actuales de vertimiento y otros costos). El escenario 2, contempla la implementación del evaporador piloto desarrollado en este proyecto, basándose en costos de materiales y de operación de la actualidad (Ver Anexo K. Costos de instalación y operación evaporador y condensador).

Para la empresa CES S.A., el segundo escenario resultó siendo el más atractivo, debido a que el tiempo de retorno (payback time) fue de 47,39 meses, además de obtenerse una rentabilidad de retorno del proyecto (TIR), del 0,89% EM (efectivo mensual), siendo mayor que el incremento estimado por inflación.

Es necesario aclarar que, el caso 1 representa los “ingresos” del análisis, y el caso 2 representa los “egresos”. Asimismo, el costo operativo global de la compañía de generación eléctrica, así como los ingresos por concepto de la venta de energía eléctrica NO se consideraron, teniendo en cuenta que serán iguales para los casos 1 y 2, y, por ende, no tendrán efecto sobre el flujo de caja. También, se descarta la aplicación de los impuestos por concepto de regalías y renta, considerando nuevamente que será igual para ambos casos. Finalmente, se estableció un valor de inflación de 0,32% EM (efectivo mensual), que corresponde

al valor de inflación anual a septiembre de 2017¹⁶, y que el volumen de reemplazo en la torre de enfriamiento se incrementa en un 10% por efecto del aumento en los meses de diciembre por efecto del incremento en la demanda.

El Anexo L. Flujo de caja mensual VPN, muestra los valores estimados como parte del análisis económico. En las siguientes gráficas se visualizan el comportamiento del Valor Presente Neto mensual – VPN, el cual inicia en -\$ 2,814 y finaliza en el año 2022 en \$458.95. De igual manera se observa el Flujo de caja mensual.

¹⁶ Consultado en línea. Disponible en: <http://www.eltiempo.com/economia/sectores/inflacion-de-colombia-en-septiembre-de-2017-138244>

Figura 10. Valor presente neto (VPN)

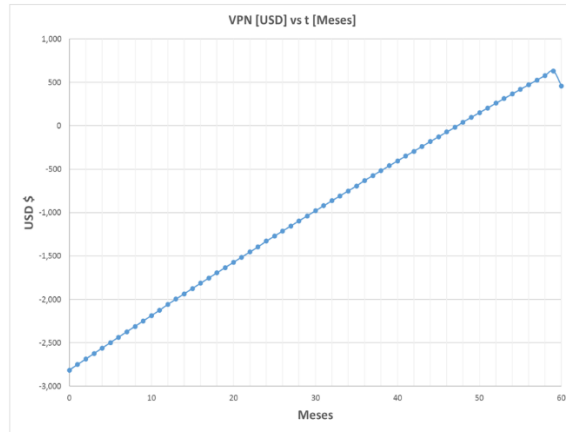
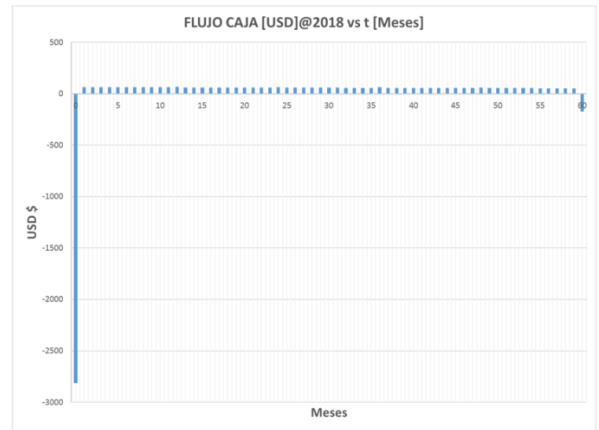


Figura 11. Flujo de caja mensual



Fuente: Resultados del cálculo del VPN y Flujo de caja mensual

Se obtuvo un costo total estimado para la construcción (en sitio) del evaporador de 1.777 USD (Ver Anexo M. Análisis económico - costo total del evaporador) y de 1.037 USD para el condensador (Anexo N. Análisis económico - costo del condensador). Se estimó que la ganancia total al final del mes 60 será 458,95 USD, descontando de ella un costo de mantenimiento general del evaporador y condensador equivalente al 10% de su valor original. (Ver Anexo L. Flujo de caja mensual VPN).

5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se realizó el diseño de un evaporador piloto, el cual es capaz de operar a las condiciones de la Compañía Eléctrica de Sochagota – CES S.A, ya que se logró obtener un sistema de refrigeración del condensador, como parte del tratamiento del agua de vertimientos para que esta recircule 100 LN/h (litros normales por hora) en su etapa piloto, y que posteriormente pueda ser escalada para tratar el volumen total de vertimientos en la compañía, es decir que se encuentre entre 40 y 70 m³/h. En el diseño del evaporador piloto se estableció un evaporador tipo calandria o vertical de tubos cortos, siendo el que más se ajusta a los requerimientos y características operativas de la compañía, con el fin de reutilizar las aguas de vertimiento en la torre de enfriamiento.

En los resultados se observa todo el proceso que debió realizarse y a su vez se dio cumplimiento a cabalidad en el diseño del evaporador piloto que permite la recuperación de efluentes para obtener agua de calidad de acuerdo conforme a los parámetros establecidos por la Compañía Eléctrica de Sochagota – CES S.A. para ser usada en el sistema de refrigeración del condensador. Este es un gran aporte desde el punto de vista ambiental y económico para la empresa, ya que se optimizó un proceso que fue primordial llevarlo a cabo, además de lograrlo en bajos costos.

Mediante esta investigación se puede concluir que se ejecutaron los objetivos propuestos, siendo posible evaluar el proceso de evaporación a escala piloto para la recuperación de los vertimientos acuosos de la CES S.A y a su vez permitieron el reúso de los mismos en la torre de enfriamiento.

6. RECOMENDACIONES

Realizar un análisis económico que incluya el escalamiento a nivel de planta del evaporador piloto diseñado en esta investigación, considerando los costos de adquisición de equipos, operación de los mismos y los cambios en el suministro de agua requerida para cumplir con la demanda energética de la CES S.A.

Realizar un estudio de impacto ambiental para comprobar el efecto positivo provocado por la eliminación de vertimientos de aguas industriales al río Chicamocha por parte de la compañía eléctrica Sochagota.

Se recomienda la realización de un estudio con evaporador de múltiple efecto, constituido por un conjunto de evaporadores de simple efecto montados en serie, para que el líquido alimentario en curso de concentración pase de un efecto a otro. Adicionando a esto que el primer cuerpo se encuentre calentado con vapor vivo mientras que los siguientes cuerpos sean calentados con vahos de vapor generados en el cuerpo precedente y finalmente que el último cuerpo está conectado a un condensador que asegure el vacío en éste.

7. BIBLIOGRAFÍA

ANIMES,K.G, GOLDER,D.V. Chemical Engineering Design, DESIGN OF EVAPORATOR. National Programme on Technology Enhanced Learning (NPTEL), P 2-10, 2008.

BASANTES M.F., MONTESDEOCA P. N., SANTOS T. M. Diseño, construcción y puesta en marcha de un evaporador de simple efecto de tubos verticales cortos. Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2014.

BROWN, G.G., Operaciones básicas de la ingeniería química, Manuel Marin S.A.,1965

CASTELLS, X. E. Reciclaje de residuos industriales: aplicación a la fabricación de materiales para la construcción. 2da Edición, Días de Santos S.A., 2009.

CENGEL, Y.A., Termodinámica, McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.,2012.

CHILEXPO, Ficha Técnica HASTELLOY C-276. Disponible en: http://www.chilexpo.com/dinamicos/calidades/539345-c276_esp.pdf

FARIÑA, D. G. Estudio de una planta desaladora abastecida por energías renovables. San Cristóbal de La Laguna: Universidad de la Laguna, 2015.

GAMBOA, E., POVEDA, R. A. Acero inoxidable 316 y 316L propiedades y características fisicoquímicas. Fundación Universitaria Los Libertadores,2011

GEANKOPLIS, J.C. Procesos de transporte y operaciones UNITARIAS. Mexico D.F: CECSA. (1998)

HELBING, W. Tablas químicas: para laboratorios e industria. Editorial Reverte S.A. 1985.

HIMMELBLAU, D.M. Principios básicos y cálculos en ingeniería química. 2da Edición. Prentice-Hall, Inc,1997.

KERN, D.Q. Procesos de Transferencia de Calor. Editorial continental. p. 466. 1999.

Mc ADAMS, W. y GILLILAND, E.A, Principios de Ingeniería Química. Editorial McGraw-Hill,1985.

McCABE, W., SMITH, J.C., Operaciones básicas de ingeniería química, Volumen 1, Editorial Reverte S.A,2003.

McCABE, W., SMITH, J.C. y HARRIOT, P. Operaciones unitarias en ingeniería química”, McGRAW-HILL, P 526-528, 2007.

NEMEROW, N.L., Tratamiento de vertidos industriales y peligrosos. Ediciones Días de Santos, S.A., 1998.

PERRY, R.H., GREEN, D.W., y MALONEY J.O. Perry manual del ingeniero químico. Editorial McGRAW-HILL. 2000.

RODRÍGUEZ, A.A., GARCÍA, P.L., GARCÍA, R.R., VALIÑO, M.D., VILLAR, S., y SANZ, J.M. Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales, Círculo de Innovación en Tecnologías Medioambientales y Energía, 2006.

SANTAMARIA, J.O. Caracterización agua de reposición para torre de enfriamiento. Laboratorio Compañía Eléctrica Sochagota, 2016.

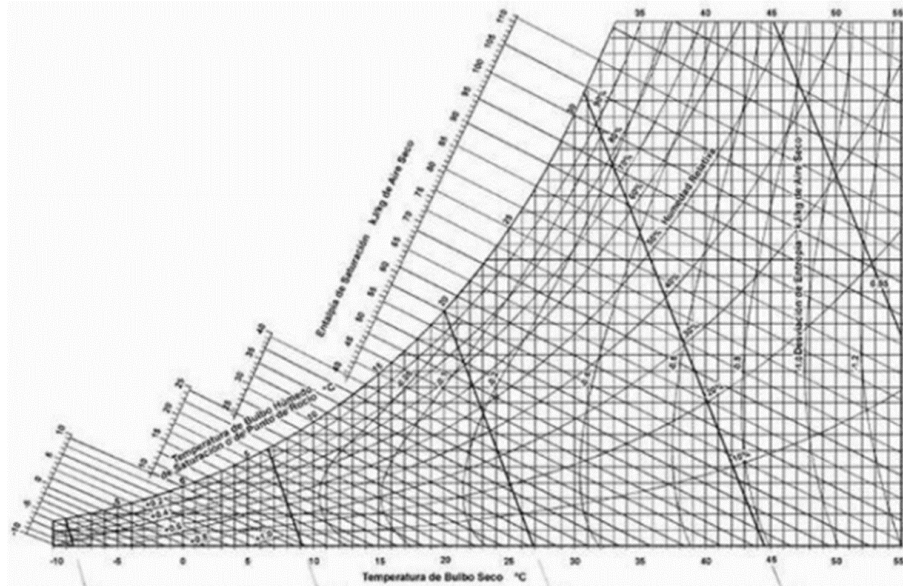
SOTO, I.S., WERNER, L.R., Evaluación técnica y económica de una central termoeléctrica en la región de los ríos, Universidad Austral de Chile, Escuela de Ingeniería Civil Mecánica, septiembre 2009.

WALAS, S. M. Chemical Process Equipment Selection and Design, butterworth-heinemann. p. 208. 1988.

WESTON, C., Fundamentos de operaciones unitarias: series de clases en ingeniería química, depto. De ingeniería química y bioprocesos. Pontificia Universidad Católica de Chile. 2006.

ANEXOS

Anexo A. Carta psicrométrica



Anexo B. Balance de energía para el cálculo del caudal

$$\dot{m}_v * H_v + \dot{m}_f * h_f = \dot{m}_s * h_s + \dot{m}_e * h_e \quad (3)$$

El vapor de calentamiento entra al evaporador a presión de 2 bar y a la temperatura de 120°C se toma el dato de entalpia en las tablas como vapor de agua sobrecalentado a la temperatura de entrada del mismo:

$$H_v = 2706,7 \text{ kJ/kg}$$

Además; teniendo como referencia la tesis sobre un evaporador similar desarrollada en la ESPOL; se decide tomar el valor promedio de la eficiencia hallada experimentalmente allí, la cual es de un 70%; con este dato se procede a hallar \dot{m}_v :

$$e = \frac{\dot{m}_e}{\dot{m}_v} = 0,7 \quad (4)$$

Despejando \dot{m}_v de la ecuación (3):

$$\dot{m}_v = \frac{\dot{m}_e}{0,7} = \frac{99,467 \frac{kg}{h}}{0,7} = 142,09 \frac{kg}{h}$$

Anexo C. Numero de tubos para el cálculo del caudal

$$n = \frac{A}{\pi * D_0 * L} \quad (7)$$

(Fausto Ricardo Basantes Montenegro, 2014, pág. 44)

Dónde:

A= Área de transferencia de calor

D0=Diámetro externo de los tubos

L=longitud de los tubos

$$n = \frac{1,565 \text{ m}^2}{\pi * 0,032 \text{ m} * 0,5 \text{ m}} = 31,3 = 32 \text{ tubos}$$

Anexo D. Balance de masa para el condensador

$$\dot{m}_e + \dot{m}_a = \dot{m}_d + \dot{m}_{a'}$$

Se asume condensación completa:

$$\dot{m}_e = \dot{m}_d$$

$$\dot{m}_a = \dot{m}_{a'}$$

$$Q_D = \frac{\dot{m}_d}{\rho} \quad \rho = 998,39 \frac{kg}{m^3}$$

$$Q_f = \frac{99,467 \frac{kg}{h}}{998,39 \frac{kg}{m^3}} = 0,0996274 \frac{m^3}{h} \quad ;$$

Anexo E. Cálculo del caudal

Para el equipo piloto, la compañía decide que se va a realizar el tratamiento de 0,1 m³/h, para realización de cálculos posteriores es necesario conocer el flujo másico de este caudal:

$$Q_e = \frac{\dot{m}_e}{\rho} \quad (1)$$

$$Q_f = 0,1 \frac{m^3}{h} \quad ; \quad \rho = 995,41 \frac{kg}{m^3}$$

$$\dot{m}_f = Q_f * \rho = 0,1 \frac{m^3}{h} * 995,41 \frac{kg}{m^3} = 99,541 \frac{kg}{h}$$

Anexo F. Balance de masa para el cálculo del caudal

$$\dot{m}_f + \dot{m}_v = \dot{m}_s + \dot{m}_e + \dot{m}_l \quad (2)$$

$$\dot{m}_v = \dot{m}_l$$

Se asume que se evapora todo el caudal de agua dejando en el fondo los sólidos que contenía.

$$\dot{m}_e = \dot{m}_f - \dot{m}_f * X_{sto}^F$$

Tomamos el dato de solidos totales en la alimentación al evaporador de la Tabla 2., por medio del caudal y conversión de unidades se obtiene el valor de X_{sto}^F :

$$\dot{m}_{stof} = 732.333 \frac{mg}{l} * \frac{1 g}{1000 mg} * \frac{1 kg}{1000g} * \frac{100 l}{1 h} = 0,07323 \frac{kg}{h}$$

$$X_{sto}^F = 0,07323 \frac{kg}{1 h} * \frac{1 h}{99.541 kg}$$

$$X_{sto}^F = 0,00074$$

$$\dot{m}_e = \dot{m}_f - \dot{m}_f * X_{sto}^F$$

$$\dot{m}_e = 99,541 - 99,541 * 0,00074 = 99,467 \text{ kg/h}$$

$$\dot{m}_s = \dot{m}_f - \dot{m}_e$$

$$\dot{m}_s = 99,541 \frac{kg}{h} - 99,467 \frac{kg}{h} = 0,074 \frac{kg}{h}$$

Anexo G. Cantidad necesaria de calor para el cálculo del caudal

La cantidad de calor a transferir/recibir se calcula por medio de la siguiente formula:

$$q = \dot{m}_e \lambda_e \quad (5)$$

Donde λ_e es la entalpia de vaporización del vapor de agua saliente de la cámara de evaporación, se toma la presión (0,01 bar) a la cual se va a trabajar el equipo y en una tabla de vapor de agua saturada se lee λ_e .

$$q = 99,467 \frac{kg}{h} * 2513,7 \frac{kJ}{kg} = 250030,198 \frac{kJ}{h}$$

Anexo H. Área de intercambio de calor para el cálculo del caudal

Para conocer área de intercambio de calor es necesario acudir a una de las fórmulas para hallar la cantidad de calor a recibir/transmitir:

$$q = A * U * \Delta T \quad (6)$$

Con el valor de U, se despeja A de la ecuación (6)

$$A = \frac{q}{U * \Delta T} = \frac{250030,198 \frac{kJ}{h}}{6790,84 \frac{kJ}{m^2 * ^\circ K * h} * (303,65 - 280,1196)K} = 1,565 m^2$$

Anexo I. Balance de energía para el condensador

$$\dot{m}_e * H_e + \dot{m}_a * h_a = \dot{m}_d * h_d + \dot{m}_{a'} * h_{a'}$$

Los valores de entalpia son hallados en las tablas de agua saturada por medio de la temperatura, se asume que el agua de enfriamiento entra a temperatura ambiente y sale a 30°C. Se procede a hallar la cantidad de agua de enfriamiento necesaria.

$$\begin{aligned} \dot{m}_a * (h_a - h_{a'}) &= \dot{m}_d * (h_d - h_e) \\ \dot{m}_a &= \frac{\dot{m}_d * (h_d - h_e)}{(h_a - h_{a'})} \\ \dot{m}_a &= \frac{99,467 \frac{kg}{h} * (81,86 \frac{kJ}{kg} - 2513,7 \frac{kJ}{kg})}{(54,6 \frac{kJ}{kg} - 209,34 \frac{kJ}{kg})} \end{aligned}$$

$$\dot{m}_a = 2141,93 \frac{kg}{h}$$

Anexo J. Costos actuales de vertimiento y otros costos

Año	Mes	AGUA VERTIDA		OTROS
		Tratamiento	Multas	Otros Gastos
	0	\$ -	\$ -	\$ -
2018	1	\$7.27	\$0.36	\$3.63
	2	\$7.27	\$0.36	\$3.63
	3	\$7.27	\$0.36	\$3.63
	4	\$7.27	\$0.36	\$3.63
	5	\$7.27	\$0.36	\$3.63
	6	\$7.27	\$0.36	\$3.63
	7	\$7.27	\$0.36	\$3.63
	8	\$7.27	\$0.36	\$3.63
	9	\$7.27	\$0.36	\$3.63
	10	\$7.27	\$0.36	\$3.63
	11	\$7.27	\$0.36	\$3.63
	12	\$8.00	\$0.40	\$4.00
2019	13	\$7.27	\$0.36	\$3.63
	14	\$7.27	\$0.36	\$3.63
	15	\$7.27	\$0.36	\$3.63
	16	\$7.27	\$0.36	\$3.63
	17	\$7.27	\$0.36	\$3.63
	18	\$7.27	\$0.36	\$3.63
	19	\$7.27	\$0.36	\$3.63
	20	\$7.27	\$0.36	\$3.63
	21	\$7.27	\$0.36	\$3.63
	22	\$7.27	\$0.36	\$3.63
	23	\$7.27	\$0.36	\$3.63
	24	\$8.00	\$0.40	\$4.00
2020	25	\$7.27	\$0.36	\$3.63
	26	\$7.27	\$0.36	\$3.63
	27	\$7.27	\$0.36	\$3.63
	28	\$7.27	\$0.36	\$3.63
	29	\$7.27	\$0.36	\$3.63
	30	\$7.27	\$0.36	\$3.63
	31	\$7.27	\$0.36	\$3.63
	32	\$7.27	\$0.36	\$3.63
	33	\$7.27	\$0.36	\$3.63
	34	\$7.27	\$0.36	\$3.63
	35	\$7.27	\$0.36	\$3.63
	36	\$8.00	\$0.40	\$4.00

Continuación Anexo J. Costos actuales de vertimiento y otros costos

Año	Mes	AGUA VERTIDA		OTROS
		Tratamiento	Multas	Otros Gastos
2021	37	\$7.27	\$0.36	\$3.63
	38	\$7.27	\$0.36	\$3.63
	39	\$7.27	\$0.36	\$3.63
	40	\$7.27	\$0.36	\$3.63
	41	\$7.27	\$0.36	\$3.63
	42	\$7.27	\$0.36	\$3.63
	43	\$7.27	\$0.36	\$3.63
	44	\$7.27	\$0.36	\$3.63
	45	\$7.27	\$0.36	\$3.63
	46	\$7.27	\$0.36	\$3.63
	47	\$7.27	\$0.36	\$3.63
	48	\$8.00	\$0.40	\$4.00
	2022	49	\$7.27	\$0.36
50		\$7.27	\$0.36	\$3.63
51		\$7.27	\$0.36	\$3.63
52		\$7.27	\$0.36	\$3.63
53		\$7.27	\$0.36	\$3.63
54		\$7.27	\$0.36	\$3.63
55		\$7.27	\$0.36	\$3.63
56		\$7.27	\$0.36	\$3.63
57		\$7.27	\$0.36	\$3.63
58		\$7.27	\$0.36	\$3.63
59		\$7.27	\$0.36	\$3.63
60		\$8.00	\$0.40	\$4.00

Anexo K. Costos de instalación y operación evaporador y condensador

Año	Mes	Vapor sobrecalentado	Agua de enfriamiento
Año 2018 - Mes 0 - Evaporador \$1,777.00 -- Condensador \$1,037.00			
	0	\$ -	\$ -
	1	\$6.22	\$2.97
	2	\$6.22	\$2.97
	3	\$6.22	\$2.97
	4	\$6.22	\$2.97
2018	5	\$6.22	\$2.97
	6	\$6.22	\$2.97
	7	\$6.22	\$2.97
	8	\$6.22	\$2.97
	9	\$6.22	\$2.97
	10	\$6.22	\$2.97
	11	\$6.22	\$2.97
	12	\$6.84	\$3.27
	13	\$6.22	\$2.97
	14	\$6.22	\$2.97
	15	\$6.22	\$2.97
	16	\$6.22	\$2.97
2019	17	\$6.22	\$2.97
	18	\$6.22	\$2.97
	19	\$6.22	\$2.97
	20	\$6.22	\$2.97
	21	\$6.22	\$2.97
	22	\$6.22	\$2.97
	23	\$6.22	\$2.97
	24	\$6.84	\$3.27
	25	\$6.22	\$2.97
	26	\$6.22	\$2.97
2020	27	\$6.22	\$2.97
	28	\$6.22	\$2.97
	29	\$6.22	\$2.97
	30	\$6.22	\$2.97
	31	\$6.22	\$2.97
	32	\$6.22	\$2.97
	33	\$6.22	\$2.97
	34	\$6.22	\$2.97
	35	\$6.22	\$2.97
	36	\$6.84	\$3.27

Año	Mes	Vapor sobrecalentado	Agua de enfriamiento
	37	\$6.22	\$2.97
	38	\$6.22	\$2.97
	39	\$6.22	\$2.97
	40	\$6.22	\$2.97
	41	\$6.22	\$2.97
2021	42	\$6.22	\$2.97
	43	\$6.22	\$2.97
	44	\$6.22	\$2.97
	45	\$6.22	\$2.97
	46	\$6.22	\$2.97
	47	\$6.22	\$2.97
	48	\$6.84	\$3.27
	49	\$6.22	\$2.97
	50	\$6.22	\$2.97
	51	\$6.22	\$2.97
2022	52	\$6.22	\$2.97
	53	\$6.22	\$2.97
	54	\$6.22	\$2.97
	55	\$6.22	\$2.97
	56	\$6.22	\$2.97
	57	\$6.22	\$2.97
	58	\$6.22	\$2.97
	59	\$6.22	\$2.97
	60	\$6.84	\$3.27
	Año 2022 - Mes 60 - Evaporador \$177.70 -- Condensador \$103.70		

Anexo L. Flujo de caja mensual VPN

AÑO	MES	INGRESOS	EGRESOS	FLUJO CAJA	FLUJO CAJA @ ENERO 2018	VPN
	0	0	\$ 2,814.00	-\$ 2,814.00	-\$ 2,814.00	-\$ 2,814.00
	1	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 63.65	-\$ 2,750.35
	2	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 63.45	-\$ 2,686.90
	3	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 63.24	-\$ 2,623.66
	4	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 63.04	-\$ 2,560.62
	5	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 62.83	-\$ 2,497.79
2018	6	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 62.63	-\$ 2,435.16
	7	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 62.43	-\$ 2,372.73
	8	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 62.22	-\$ 2,310.51
	9	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 62.02	-\$ 2,248.48
	10	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 61.82	-\$ 2,186.66
	11	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 61.62	-\$ 2,125.04
	12	\$ 80	\$ 10.11	\$ 70.25	\$ 67.56	-\$ 2,057.47
	13	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 61.22	-\$ 1,996.25
	14	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 61.02	-\$ 1,935.23
	15	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 60.83	-\$ 1,874.40
	16	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 60.63	-\$ 1,813.77
	17	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 60.43	-\$ 1,753.34
2019	18	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 60.24	-\$ 1,693.10
	19	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 60.04	-\$ 1,633.05
	20	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 59.85	-\$ 1,573.21
	21	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 59.65	-\$ 1,513.55
	22	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 59.46	-\$ 1,454.09
	23	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 59.27	-\$ 1,394.82
	24	\$ 80	\$ 10.11	\$ 70.25	\$ 64.98	-\$ 1,329.84

Continuación Anexo L. Flujo de caja mensual VPN

AÑO	MES	INGRESOS	EGRESOS	FLUJO CAJA	FLUJO CAJA @ ENERO 2018	VPN
2020	25	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 58.89	-\$ 1,270.95
	26	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 58.69	-\$ 1,212.26
	27	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 58.50	-\$ 1,153.75
	28	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 58.32	-\$ 1,095.44
	29	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 58.13	-\$ 1,037.31
	30	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 57.94	-\$ 979.37
	31	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 57.75	-\$ 921.62
	32	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 57.56	-\$ 864.06
	33	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 57.38	-\$ 806.68
	34	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 57.19	-\$ 749.49
	35	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 57.01	-\$ 692.49
	36	\$ 80	\$ 10.11	\$ 70.25	\$ 62.50	-\$ 629.98
2021	37	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 56.64	-\$ 573.35
	38	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 56.45	-\$ 516.89
	39	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 56.27	-\$ 460.62
	40	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 56.09	-\$ 404.53
	41	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 55.91	-\$ 348.63
	42	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 55.73	-\$ 292.90
	43	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 55.55	-\$ 237.36
	44	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 55.37	-\$ 181.99
	45	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 55.19	-\$ 126.80
	46	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 55.01	-\$ 71.80
	47	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 54.83	-\$ 16.97
	48	\$ 80	\$ 10.11	\$ 70.25	\$ 60.12	\$ 43.15
2022	49	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 54.47	\$ 97.62
	50	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 54.30	\$ 151.92
	51	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 54.12	\$ 206.04
	52	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 53.95	\$ 259.99
	53	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 53.77	\$ 313.76
	54	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 53.60	\$ 367.36
	55	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 53.42	\$ 420.78
	56	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 53.25	\$ 474.03
	57	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 53.08	\$ 527.11
	58	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 52.91	\$ 580.02
	59	\$ 73	\$ 9.19	\$ 63.86	\$ 52.74	\$ 632.76
	60	\$ 80	\$ 291.51	-\$ 211.15	-\$ 173.80	\$ 458.95

Anexo M. Análisis económico - costo total del evaporador

Elemento	Material	Disponibilidad en el mercado	Cantidad	Precio unitario [USD]	Total [USD]
Tubos de 1 1/4"	Acero inoxidable ASTM 316	Tubos de 6 m de longitud	2	46	92
Tubo central	Acero inoxidable ASTM 316 L	Lámina de 1.22 mm x 2.44 mm	1	271	271
Carcasa	Acero inoxidable ASTM 316	Lámina de 1.22 mm x 2.44 mm	1	450	450
Accesorios	Hastelloy C-276	Válvulas, uniones, tapas	6	40	240
Cilindro hueco (cuerpo)	Acero inoxidable ASTM 516	Lámina de 1.22 mm x 2.44 mm	1	224	224
Construcción (en sitio)	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	500
				TOTAL	1.777

Anexo N. Análisis económico - costo del condensador

Elemento	Material	Disponibilidad en el mercado	Cantidad	Precio unitario [USD]	Total [USD]
Tubos de 1 1/4"	Acero inoxidable ASTM 316	Tubos de 6 m de longitud	2	46	92
Tubo central	Acero inoxidable ASTM 316 L	Lámina de 1.22 mm x 2.44 mm	1	271	271
Carcasa	Acero inoxidable ASTM 316	Lámina de 1.22 mm x 2.44 mm	1	450	450
Cilindro hueco (cuerpo)	Acero inoxidable ASTM 516	Lámina de 1.22 mm x 2.44 mm	1	224	224
Construcción (en sitio)	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	250
				TOTAL	1.037

Anexo O. Análisis económico caudales de fluidos

q reemplazo en torre [m ³ /h]	0.0996
q reemplazo en torre diciembre [m ³ /h]	0.1096
m vapor [kg/h]	142.09
q agua de enfriamiento [m ³ /h]	214.301

Anexo P. Análisis económico - costos operativos [USD/m³]

Agua de recolección del río	0.19
Clarificación del agua	0.24
Desmineralización del agua	0.4
Operación de bomba	0.02
Tratamiento previo a vertimiento	0.1
Multas ambientales	0.005
Otros gastos	0.05
Generación de vapor sobrecalentado [USD/kg]	0.00006
Agua de enfriamiento	0.0019

Anexo Q. Costos actuales de captación de agua

Año	Mes	AGUA DE REEMPLAZO CAPTADA			
		Captación	Clarificación	Desmineralización	Bombeo
2018	0	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
	1	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	2	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	3	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	4	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	5	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	6	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	7	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	8	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	9	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	10	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	11	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
2019	12	\$15.19	\$19.19	\$31.98	\$1.60
	13	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	14	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	15	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	16	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	17	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	18	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	19	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	20	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	21	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	22	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	23	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
2020	24	\$15.19	\$19.19	\$31.98	\$1.60
	25	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	26	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	27	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	28	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	29	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	30	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	31	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	32	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	33	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	34	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	35	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
36	\$15.19	\$19.19	\$31.98	\$1.60	

Continuación Anexo Q. Costos actuales de captación de agua

Año	Mes	AGUA DE REEMPLAZO CAPTADA			
		Captación	Clarificación	Desmineralización	Bombeo
2021	37	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	38	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	39	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	40	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	41	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	42	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	43	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	44	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	45	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	46	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	47	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	48	\$15.19	\$19.19	\$31.98	\$1.60
2022	49	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	50	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	51	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	52	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	53	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	54	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	55	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	56	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	57	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	58	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	59	\$13.81	\$17.45	\$29.08	\$1.45
	60	\$15.19	\$19.19	\$31.98	\$1.60