



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**TESIS**

**DESARROLLO DE LA INGENIERÍA BÁSICA PARA EL PROCESO DE  
DESTILACIÓN DE AGUA DESTILADA PRODUCIDA EN EL  
LABORATORIO DE INGENIERÍA QUÍMICA DE LA FACULTAD DE  
QUÍMICA**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**INGENIERA QUÍMICA**

**PRESENTA**

**EVA REYNA SERRATO DURÁN**



**CDMX**

**2023**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE: Ma. Rafaela Gutiérrez Lara**

**VOCAL: Luz María Lazcano Arriola**

**SECRETARIO: Carlos Álvarez Maciel**

**1ER. SUPLENTE: Sergio Adrián García González**

**2° SUPLENTE: Elisa Elvira Guinea Corres**

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**Laboratorio de Ingeniería Química, Facultad de Química, UNAM.**

**ASESOR DEL TEMA: M en I. Ma. Rafaela Gutiérrez Lara**

**SUPERVISOR TECNICO: IQ Claudia Julieta Espinosa Pérez**

**SUSTENTANTE: Eva Reyna Serrato Durán**

<b>Contenido</b>	
<b>1. Introducción.</b>	<b>4</b>
<b>2. Objetivos.</b>	<b>6</b>
<b>2.1. Objetivo General.</b>	<b>6</b>
<b>2.2. Objetivos particulares.</b>	<b>6</b>
<b>3. Ingeniería Básica.</b>	<b>7</b>
<b>3.1. Diagrama de flujo de proceso.</b>	<b>7</b>
<b>3.2. Diagrama de tubería e instrumentación.</b>	<b>8</b>
<b>3.3. Hoja de datos de los equipos.</b>	<b>9</b>
<b>3.4. Filosofía de operación.</b>	<b>10</b>
<b>3.5. Balance de materia y energía.</b>	<b>12</b>
<b>4. Aspectos generales del agua destilada.</b>	<b>14</b>
<b>4.1. Definición de agua tipo II.</b>	<b>14</b>
<b>4.2. Características de agua nivel 1.</b>	<b>15</b>
<b>4.3. Caracterización de agua nivel 1.</b>	<b>16</b>
<b>5. Documentos de referencia para la caracterización del agua destilada.</b>	<b>20</b>
<b>6. Desarrollo experimental.</b>	<b>22</b>
<b>6.1. Proceso de producción del agua destilada en la Facultad de Química.</b>	<b>23</b>
<b>6.2. Selección de los parámetros fisicoquímicos para la caracterización del agua destilada.</b>	<b>23</b>
<b>6.3. Implementación de las técnicas analíticas para agua destilada.</b>	<b>25</b>
<b>6.4. Presupuesto para la implementación de técnicas analíticas para la caracterización de agua destilada.</b>	<b>37</b>
<b>7. Resultados y análisis.</b>	<b>39</b>
<b>7.1. Ingeniería básica del proceso de producción del agua destilada.</b>	<b>39</b>
<b>7.1.1. Filosofía de operación.</b>	<b>39</b>
<b>7.1.2. Diagrama de flujo de proceso.</b>	<b>42</b>
<b>7.1.3. Diagrama de tubería e instrumentación.</b>	<b>44</b>
<b>7.1.4. Balance de materia y energía.</b>	<b>53</b>
<b>7.1.5. Hoja de datos de los equipos.</b>	<b>57</b>
<b>7.2. Caracterización del agua de alimentación y del agua destilada.</b>	<b>63</b>
<b>7.3. Propuesta de presupuesto para la implementación de las técnicas analíticas.</b>	<b>68</b>

<b>8. Conclusiones.....</b>	<b>71</b>
<b>9. Recomendaciones.....</b>	<b>72</b>
<b>10. Referencias.....</b>	<b>74</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>77</b>
<b>Anexo 1. Glosario .....</b>	<b>77</b>
<b>Anexo 2. Memoria de cálculo para balance de materia y energía .....</b>	<b>78</b>
<b>Anexo 3. Hoja de datos de los equipos del proceso de generación de agua destilada. ....</b>	<b>97</b>
<b>Anexo 4. Memoria de cálculo del presupuesto para la caracterización del agua destilada. ....</b>	<b>102</b>
<b>Anexo 5. Manual de técnicas analíticas para la caracterización del agua destilada producida en el Laboratorio de Ingeniería Química .....</b>	<b>107</b>
<b>Anexo 6. Diagrama de flujo de proceso y Diagrama de tubería e instrumentación .....</b>	<b>109</b>

## Índice de tablas

Tabla 1. Características fisicoquímicas de agua tipo II según la ASTM (Annual Book of ASTM Standards, 2003).....	15
Tabla 2. Características fisicoquímicas de agua nivel 1 según la FEUM (Secretaría de Salud, 2018).....	16
Tabla 3. Características fisicoquímicas del agua .....	16
Tabla 4. Documentos y métodos aplicables para agua nivel 1 .....	21
Tabla 5. Selección de parámetros, referencia o normatividad aplicada para la caracterización del agua destilada .....	25
Tabla 6. Leyenda del DFP.....	42
Tabla 7. Leyenda del DTI.....	46
Tabla 8. Balance de materia del proceso de elaboración del agua destilada.....	54
Tabla 9. Balance de energía para el proceso de generación de agua destilada.....	56
Tabla 10. Caracterización del agua en las diferentes etapas del proceso de producción del agua destilada.....	64
Tabla 11. Resumen de costos para la implementación de las técnicas analíticas para el análisis del agua destilada producida en el Laboratorio de Ingeniería Química.....	69

## 1. Introducción.

De acuerdo con la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés) el método de preparación de los distintos tipos de agua reactiva determina los límites de las impurezas y clasifica el agua reactiva tipo II como aquella que se obtiene por destilación. Debido a que la destilación es un proceso comúnmente utilizado para producir agua de alta pureza, las especificaciones para el agua reactiva tipo II se seleccionaron para representar la calidad mínima del agua que se obtiene a partir del proceso de destilación. El agua reactiva tipo II debe ser estéril y libre de pirógenos tal como se produce, sin embargo, el método de almacenamiento y manejo del agua puede resultar en contaminación. (Annual Book of ASTM Standards, 2003). De acuerdo con la Secretaría de Salud, los sistemas de purificación, circulación y almacenamiento del agua purificada nivel 1 equiparable a tipo II deben considerar elementos protectores que eviten la proliferación microbiana. Estos sistemas también requieren de un programa frecuente de sanitización y monitoreo microbiológico que garantice la adecuada calidad microbiológica en los puntos de uso. El agua purificada nivel 1 puede ser obtenida a partir de agua potable por un proceso de destilación, ósmosis inversa, tratamiento por intercambio iónico u otro método apropiado y no contiene sustancias adicionales (Secretaría de Salud, 2018).

Para corroborar la calidad del agua destilada obtenida, es necesario analizar la ingeniería básica del proceso de producción, por lo que se incluye el Diagrama de Flujo de Proceso (DFP), balance de materia y energía, filosofía de operación, hoja de datos de los equipos y Diagrama de Tuberías e Instrumentación (DTI). Las condiciones del proceso actual permiten averiguar si éstas son óptimas para la generación del agua destilada (Sinnott, 2005), y son la base para considerar la ingeniería de detalle para futuros análisis y mejoras al proceso a través del DTI.

Este trabajo tiene la finalidad de mostrar el proceso de producción de agua destilada en la Facultad de Química, UNAM y la importancia de la calidad de ésta, por tanto, se presentan las técnicas analíticas implementadas para caracterizar el agua destilada y asegurar que la calidad es adecuada, y así cumplir con el criterio de agua tipo II, de modo

que el trabajo en los laboratorios de docencia e investigación no se vea comprometido por este insumo.

Cabe mencionar que la Facultad de Química no cuenta con un laboratorio de control analítico para la caracterización del agua destilada, por lo que, con este trabajo, además se desarrolló un manual de técnicas analíticas donde se presentan a detalle los parámetros que se deben determinar para el tipo de agua en estudio. Las técnicas y metodologías utilizadas se presentan con base a la Farmacopea de los Estados Unidos Mexicanos (FEUM) y a normas mexicanas vigentes (NMX). Los parámetros establecidos son: pH, conductividad, sustancias oxidables, metales pesados y nitratos, además por tener un agua de proceso que proviene de uno de los pozos de Ciudad Universitaria, se adicionaron la determinación de dureza, sílice y alcalinidad.

Finalmente, se reporta un estimado del costo unitario para cada parámetro a caracterizar, considerando materiales, reactivos y equipos involucrados, cuya finalidad es establecer y proponer un presupuesto anual para realizar esta actividad en las instalaciones del Laboratorio de Ingeniería Química.

## **2. Objetivos.**

### **2.1. Objetivo General.**

Generar los documentos de Ingeniería Básica para el proceso de producción de agua destilada en el Laboratorio de Ingeniería Química, así como la caracterización de parámetros fisicoquímicos que se debe cumplir bajo referencias establecidas.

### **2.2. Objetivos particulares.**

- Esquematizar a través de un levantamiento en sitio el sistema de producción de agua destilada en el Laboratorio de Ingeniería Química mediante un Diagrama de Flujo de Proceso (DFP) y un Diagrama de Tuberías e Instrumentación (DTI).
- Identificar las variables involucradas en el proceso con balance de materia y energía.
- Seleccionar las técnicas analíticas para un agua destilada que cumpla con las características “nivel 1” para la evaluación de la calidad del agua destilada producida en el Laboratorio de Ingeniería Química.
- Implementar las técnicas analíticas para la caracterización del agua destilada “nivel 1” e identificar posibles anomalías en el producto.
- Elaborar un manual de técnicas analíticas de los parámetros establecidos para la caracterización del agua destilada “nivel 1”.
- Realizar un presupuesto del costo unitario de los parámetros establecidos para el análisis de calidad del agua destilada “nivel 1”.

### **3. Ingeniería Básica.**

#### **3.1. Diagrama de flujo de proceso.**

El diagrama de flujo del proceso es el documento principal producto de la ingeniería básica del proceso, es una representación esquemática y lógica de las operaciones unitarias y líneas principales que constituyen al mapa del proceso, para lo cual debe ser clara, completa y precisa. Los datos sobre el caudal de cada componente individual, sobre el caudal total de la corriente y la composición porcentual, se pueden mostrar en el diagrama de flujo de varias maneras (Figura 1). La presentación de datos en diagramas de flujo se muestra como una línea de flujo numerada y los datos tabulados en la parte inferior de la hoja. La información esencial que debe contener un diagrama de flujo de proceso es la siguiente (Sinnott, 2005):

- Composición de las corrientes ya sea como el caudal individual de cada componente (kg/h) o la composición de la corriente en fracción másica.
- Flujo total de las corrientes (kg/h)
- Temperatura de las corrientes (°C)
- Presión operativa nominal o requerida

Adicionalmente puede contener información opcional

- Porcentajes de composición molar
- Datos de propiedades físicas (densidad y viscosidad)
- Nombre específico de las corrientes

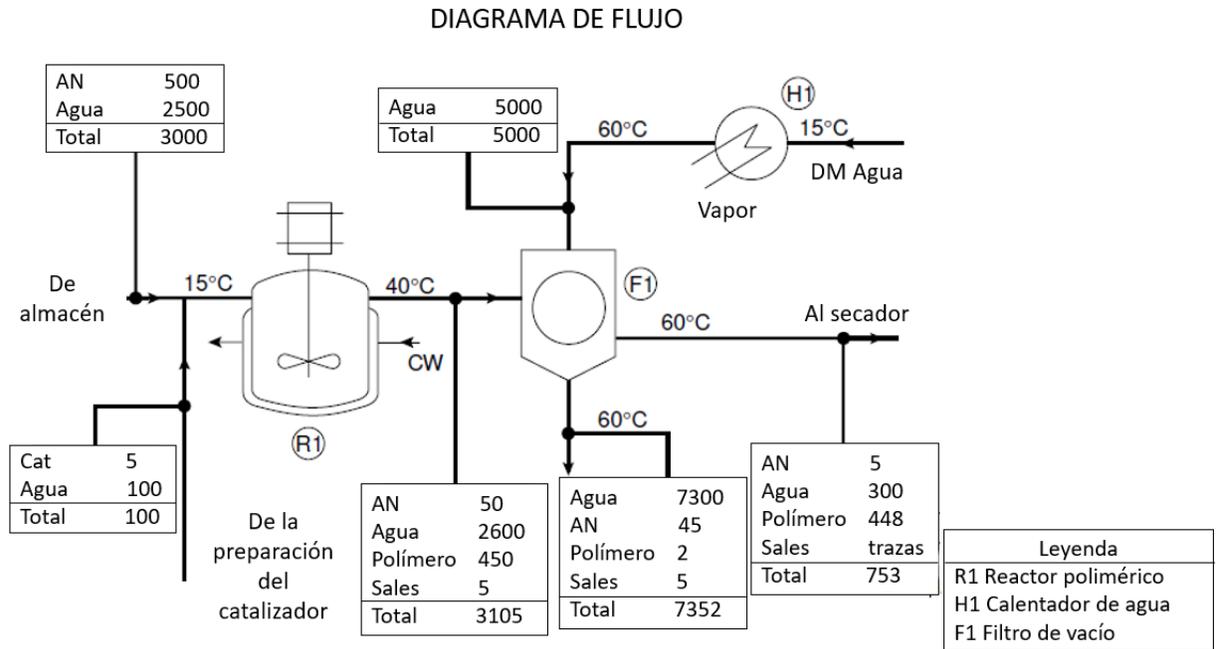


Figura 1. Ejemplo de un diagrama de flujo de producción de un polímero. Adaptación propia a partir de (Sinnott, 2005).

Cada equipo mostrado en el diagrama de flujo debe identificarse con un número de código y un nombre. El número de identificación (generalmente una letra y algunos dígitos) será normalmente el asignado a un equipo en particular como parte de los procedimientos generales de control del proyecto, y se utilizará para identificarlo en todos los documentos del proyecto. Si el diagrama de flujo no es parte de la documentación de un proyecto, entonces se debe idear un código de identificación simple pero consistente. El código más fácil es usar una letra inicial para identificar el tipo de equipo, seguida de dígitos para identificar la pieza en particular. Por ejemplo, intercambiadores de calor H, columnas C, reactores RR. La clave del código debe mostrarse en el diagrama de flujo (Sinnott, 2005).

### 3.2. Diagrama de tubería e instrumentación.

El diagrama de tubería e instrumentación (DTI) muestra la disposición del equipo de proceso, tuberías, bombas, instrumentos, válvulas y otros accesorios de forma detallada. Debe incluir:

- Todo el equipo de proceso está identificado por un número de equipo. El equipo debe dibujarse aproximadamente en proporción y debe mostrarse la ubicación de las boquillas.
- Todas las tuberías deben estar identificadas por un número de línea. Se debe mostrar el tamaño de la tubería y el material de construcción. El material puede incluirse como parte del número de identificación de línea.
- Todas las válvulas, tanto de control y de bloqueo, deben tener un número de identificación. Se debe mostrar el tipo y el tamaño; el tipo puede mostrarse con el símbolo utilizado para la válvula o incluirse en el código utilizado para el número de válvulas.
- Accesorios auxiliares que forman parte del sistema de tuberías, como mirillas en línea, filtros y trampas de vapor; con un número de identificación.
- Bombas y otros equipos motrices, deben ser identificadas por un número de código adecuado.
- Todos los lazos de control e instrumentos deben contar con número de identificación.

Para procesos simples, las líneas de utilidad (servicio) se pueden mostrar en el DTI. Para procesos complejos, se deben usar diagramas separados para mostrar las líneas de servicio, de modo que la información se pueda mostrar claramente, sin abarrotar el diagrama. Sin embargo, las conexiones de servicio a cada unidad deben mostrarse en el DTI (Sinnott, 2005).

El DTI se parecerá al diagrama de flujo del proceso, pero no muestra la misma información del DFP, pues es un documento más detallado que además muestra la totalidad de equipos, no sólo las operaciones unitarias. Se deben usar los mismos números de identificación del equipo en ambos diagramas (Sinnott, 2005).

### **3.3. Hoja de datos de los equipos.**

La lista de equipos es una compilación de todos los equipos que cuestan más que una bomba, junto con información suficiente sobre cada pieza para estimar su costo. La lista se desarrolla directamente a partir del DTI. Cada equipo que se muestra en el DFP debe aparecer en la lista de equipos. Los símbolos asignados a cada equipo se incluyen en la

lista de equipos para proporcionar una referencia cruzada entre la lista, el DTI y el DFP. Cada equipo de esta lista debe tener su Hoja de Datos. Para determinar el costo de compra e instalación de cada equipo, se deben especificar los siguientes factores principales: (Bassel, 1974)

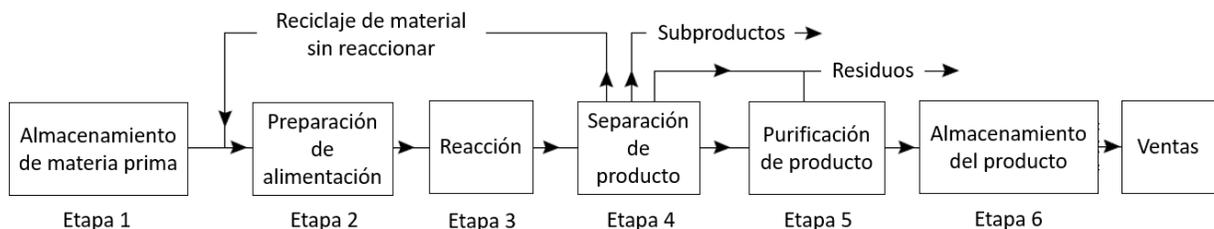
1. Tipo específico de equipo.
2. Tamaño y/o capacidad.
3. Material de construcción.
4. Presión de funcionamiento.
5. Temperatura máxima si el equipo debe funcionar por encima de la temperatura ambiente.
6. Temperatura mínima si el equipo va a ser refrigerado.
7. Aislamiento requerido.
8. Márgenes de corrosión, especialmente si son grandes.
9. Características especiales como cubierta o empaque en intercambiadores de calor o condiciones especiales como el enterramiento de un tanque de almacenamiento (Bassel, 1974).

Los detalles de diseño mecánico como los espesores de la carcasa o la cabeza, no se incluyen, ya que no tienen un efecto directo en el rendimiento del equipo. Sin embargo, para ciertos tipos de equipos que involucran condiciones de operación inusuales o extremas, el ingeniero puede necesitar ampliar las especificaciones para incluir detalles adicionales del diseño mecánico. Las ubicaciones y los tamaños de las salidas, los soportes y otra información esencial de fabricación se pueden presentar con las especificaciones en forma de comentarios o dibujos (Timmerhaus, 1991).

### **3.4. Filosofía de operación.**

Los componentes básicos de un proceso químico típico se muestran en la figura 2, en la que cada bloque representa una etapa en el proceso general para producir un producto a partir de materias primas. La figura 2 representa un proceso generalizado; no todas las etapas serán necesarias para cualquier proceso en particular, y la complejidad de cada etapa dependerá de la naturaleza del proceso. El diseño de ingeniería química se refiere a la selección y disposición de las etapas, y la selección, especificación y diseño del

equipo requerido para realizar las funciones dependiendo del escenario; cada etapa se explica a continuación (Sinnott, 2005).



*Figura 2. Anatomía de un proceso químico. Adaptación propia a partir de (Sinnott, 2005).*

Etapa 1 - Almacenamiento de materia prima. A menos que las materias primas (también llamadas materiales esenciales, o existencias de alimentación) se suministren como productos intermedios de una planta vecina, se deberán realizar algunas disposiciones para mantener varios días o semanas para suavizar las fluctuaciones e interrupciones en el suministro. El almacenamiento requerido dependerá de la naturaleza de las materias primas, el método de entrega y qué garantía se puede poner en la continuidad del suministro. Si los materiales son entregados por barco (petrolero o transportista a granel) varias semanas pueden ser necesarias; mientras que, si son recibidos por carretera o ferrocarril, en lotes más pequeños, se necesitará menos almacenamiento (Sinnott, 2005).

Etapa 2 - Preparación de alimentación. Alguna purificación y preparación de las materias primas generalmente serán necesarias para ser alimentadas a la etapa de reacción. Las materias primas líquidas deberán ser vaporizadas antes de ser alimentadas a reactores de fase gaseosa, y los sólidos pueden necesitar trituración, molienda y cribado (Sinnott, 2005).

Etapa 3 – Reacción. La etapa de reacción es el corazón de un proceso de fabricación de productos químicos. En el reactor, las materias primas se unen en condiciones que promueven la producción del producto deseado; invariablemente también se formarán subproductos y compuestos no deseados (impurezas) (Sinnott, 2005).

Etapa 4 - Separación de producto. En esta primera etapa después del reactor, los productos y los subproductos se separan de cualquier material no reaccionado. Si existe una cantidad suficiente, el material sin reaccionar se reciclará al reactor. Se puede devolver directamente al reactor o a la etapa de purificación o preparación de alimentación. Los subproductos también pueden separarse de los productos en esta etapa (Sinnott, 2005).

Etapa 5 - Purificación del producto. Antes de la venta, el producto principal generalmente necesitará purificación para cumplir con la especificación del producto. Si se produce en cantidades económicas, los subproductos también pueden purificarse para la venta (Sinnott, 2005).

Etapa 6 - Almacenamiento del producto. Se debe realizar algún inventario del producto terminado para que coincida con la producción relacionada con ventas. También se necesitará una provisión para el envasado y el transporte de productos, dependiendo de la naturaleza del producto. Los líquidos normalmente se enviarán en tambores y en camiones cisterna a granel (carretera, ferrocarril y mar), sólidos en sacos, cajas o fardos. Las acciones mantenidas dependen de la naturaleza del producto y del mercado (Sinnott, 2005).

Además de las principales etapas del proceso que se muestran en la figura 2, se deberá prever el suministro de los servicios necesarios o auxiliares; tales como, agua de proceso, agua de refrigeración, aire comprimido, vapor, entre otros. También se necesitarán instalaciones para mantenimiento, extinción de incendios, oficinas, otros alojamientos y laboratorios (Sinnott, 2005).

### **3.5. Balance de materia y energía.**

Los balances de materia son la base del diseño de procesos. Un balance de materia tomado sobre el proceso completo determinará las cantidades de materias primas requeridas y los productos obtenidos. Los balances sobre unidades de proceso individuales establecen los flujos y composiciones de la corriente del proceso. Los balances de materia también son herramientas útiles para el estudio del funcionamiento

de la planta y la resolución de problemas. Se pueden utilizar para comparar el rendimiento con el diseño; ampliar los datos, a menudo limitados, disponibles de la instrumentación de la planta; para verificar las calibraciones de los instrumentos; y para localizar fuentes de pérdidas materiales (Sinnott, 2005).

La ecuación de conservación general para cualquier sistema de proceso se puede escribir como:

$$\textit{Salida de material} = \textit{Entrada de material} + \textit{Generación} - \textit{Consumo} - \textit{Acumulación}$$

Para un proceso en estado estacionario, el término de acumulación será cero. Excepto en los procesos nucleares, la masa no se genera ni se consume; pero si tiene lugar una reacción química, una especie química particular puede formarse o consumirse en el proceso. Si no hay reacción química, el equilibrio de estado estacionario se reduce a: (Sinnott, 2005)

$$\textit{Salida de materia} = \textit{Entrada de materia}$$

El balance de energía se fundamenta con la conservación de la energía, pues la energía puede existir en varias formas: calor, energía mecánica, energía eléctrica, por lo que la energía total es la que se conserva. Debido a que la energía se puede generar o consumir en un proceso con reacción química, la entalpía total de las corrientes de salida no será igual a la de las corrientes de entrada, y su diferencia contiene al calor de reacción.

En el diseño de procesos se realizan balances de energía para determinar los requerimientos energéticos del proceso: la calefacción, refrigeración y potencia requerida. En la operación de la planta, un balance energético (auditoría energética) mostrará el patrón de uso de energía y sugerirá áreas para conservación y ahorro.

Para la cuantificación de los cambios energéticos durante un proceso, se puede escribir una ecuación general para la conservación de la energía:

$$\textit{Salida de energía} = \textit{Entrada de energía} + \textit{Generación} - \textit{Consumo} - \textit{Acumulación}$$

Este es un enunciado de la primera ley de la termodinámica. Se puede escribir un balance de energía para cualquier paso del proceso. La reacción química generará

energía (exotérmica) o consumirá energía (endotérmica). Para procesos en estado estacionario, la acumulación de masa y energía será cero (Sinnott, 2005).

#### **4. Aspectos generales del agua destilada.**

##### **4.1. Definición de agua tipo II.**

De acuerdo con la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM), el método de preparación de los distintos tipos de agua reactiva determina los límites de las impurezas y clasifica el agua reactiva tipo II como el agua que se prepara por destilación utilizando un alambique diseñado para producir un destilado con una conductividad inferior a  $1.0 \mu\text{s}/\text{cm}$  a 298 K. El intercambio iónico, la ósmosis inversa y la adsorción orgánica pueden ser necesarios antes de la destilación si la pureza no puede alcanzarse sólo mediante destilación. Debido a que la destilación es un proceso comúnmente utilizado para producir agua de alta pureza, los niveles especificados para el agua reactiva tipo II se seleccionaron para representar la calidad mínima del agua que debe producir un proceso de destilación (Annual Book of ASTM Standards, 2003).

El agua reactiva tipo II debe ser estéril y libre de pirógenos, su uso es recomendable ya que está libre de contaminantes orgánicos o biológicos. Sin embargo, el método de almacenamiento y manejo del agua puede resultar en contaminación. El agua destilada a menudo se especifica cuando se requiere la ausencia de motas y sílice, o cuando se demuestra que los compuestos orgánicos tensoactivos son un problema, y cuando se ha encontrado que los procesos alternativos son inadecuados. El agua reactiva de tipo II debe protegerse de la contaminación atmosférica y de la disolución de material del recipiente y tubería. Se debe tener extremo cuidado en el manejo de muestras al realizar un análisis. Los recipientes y tubos de muestra deben estar hechos de fluorocarbono, titanio, tantalio, estaño en bloque, cuarzo, acero inoxidable 18-8, polietileno u otro material que haya demostrado ser lo suficientemente resistente al ataque químico para no causar contaminación en el uso previsto (Annual Book of ASTM Standards, 2003).

La Farmacopea de los Estados Unidos Mexicanos (FEUM), nos indica que un agua nivel 1 se utiliza como ingrediente en la fabricación de productos farmacéuticos no inyectables,

en la limpieza de algunos equipos y en las fases finales de síntesis de algunos principios activos. Los sistemas de purificación, circulación y almacenamiento del agua purificada nivel 1 deben considerar elementos protectores que eviten la proliferación microbiana. Estos sistemas también requieren de un programa frecuente de sanitización y monitoreo microbiológico que garantice la adecuada calidad microbiológica en los puntos de uso. El agua purificada nivel 1 puede ser obtenida a partir de agua potable por un proceso de destilación, ósmosis inversa, tratamiento por intercambio iónico u otro método apropiado, y no contiene sustancias adicionales (Secretaría de Salud, 2018). A partir de estas dos definiciones, se determina que el agua tipo II es equiparable al agua nivel 1, ya que ambas se obtienen por el proceso de destilación.

#### 4.2. Características de agua nivel 1.

El agua nivel 1 se caracteriza por ser un líquido transparente, incoloro e inodoro, además debe ser elaborada a través de un proceso de destilación para asegurar su completa purificación, sus características fisicoquímicas dependen del documento que las avalen; a continuación, mencionaremos los valores máximos de éstas, según los documentos aplicables para este tipo de agua.

De acuerdo con la ASTM, el proceso de destilación debe eliminar todo agente que produzca un alto valor de conductividad y de sílice, por tanto, el agua tipo II debe cumplir con las características fisicoquímicas citadas en la tabla 1 (Annual Book of ASTM Standards, 2003).

*Tabla 1. Características fisicoquímicas de agua tipo II según la ASTM (Annual Book of ASTM Standards, 2003).*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Conductividad eléctrica valor máximo a 25 °C ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	1.0
Sílice total valor máximo ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	3

Lo que establece la FEUM es que el proceso de destilación puede generar un agua nivel 1 con una alta calidad biológica por tanto debe cumplir con las características fisicoquímicas citadas en la tabla 2 (Secretaría de Salud, 2018).

*Tabla 2. Características fisicoquímicas de agua nivel 1 según la FEUM (Secretaría de Salud, 2018).*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
pH	5-7
Conductividad a 25 °C (μS/cm)	5.1
Sustancias oxidables (ppm) o carbono orgánico total	0.5
Metales pesados (ppm)	0.1
Nitratos (ppm)	0.2

Al ser preparada el agua nivel 1 a partir de agua potable, la FEUM indica que debe de cumplir con ciertas características de dureza total y sílice. En el caso del agua destilada producida en la Facultad de Química, el agua de alimentación del proceso proviene de agua de pozo, por tanto, se considera que el agua nivel 1 debe de cumplir con valores mínimos de alcalinidad (Jayawardana, 2016); la literatura nos indica los intervalos o valores máximos de estos parámetros según se aplique, citados en la tabla 3.

*Tabla 3. Características fisicoquímicas del agua*

<b>Parámetro</b>	<b>Intervalo / valor máximo</b>
Dureza total (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	Blanda: 0 a 50 (Crittenden, 2012)
Alcalinidad (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	400 (CONAGUA, 2023)

#### **4.3. Caracterización de agua nivel 1.**

La caracterización del agua nivel 1 es de vital importancia para conocer la calidad de ésta y ver si cumple con lo requerido según las características descritas anteriormente. A continuación, se indica la definición de los parámetros indicadores inorgánicos seleccionados para establecer la calidad del agua nivel 1:

##### *pH*

El pH es una medida de las propiedades ácido-base de una solución (Crittenden, 2012). Según la FEUM, el pH se define como la actividad del ion hidrógeno y éste a su vez se

define a partir del Potencial o Fuerza Electromotriz de una celda de medición específica (Secretaría de Salud, 2018). Por último, la NMX-AA-008-SCFI-2016 nos indica que la magnitud pH es considerada como una medida de la actividad de los iones hidrógeno en la disolución (Secretaría de Economía, 2023).

### *Conductividad*

La conductividad eléctrica es una medida en microsiemens por centímetro ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) o micromhos por centímetro ( $\mu\text{O}/\text{cm}$ ) de la actividad iónica de una solución en términos de su capacidad para transmitir corriente (Crittenden, 2012). La Farmacopea indica que la conductividad eléctrica del agua es una medida del flujo de electrones facilitado con iones. Las moléculas de agua se disocian en iones en función del pH y la temperatura (Secretaría de Salud, 2018).

### *Sustancias oxidables*

Las sustancias oxidables sustituyen a la prueba de carbono orgánico total, esta es una medida útil porque proporciona una evaluación de la contaminación orgánica ya que casi todos los compuestos orgánicos pueden oxidarse completamente a  $\text{CO}_2$  en presencia de un oxidante fuerte (Crittenden, 2012).

### *Metales pesados*

Los metales pesados son metales de alta densidad que están naturalmente presentes en el medio ambiente. Estos incluyen plomo, mercurio, cadmio, cromo, hierro, cobre, zinc, aluminio, berilio, cobalto, manganeso y arsénico. La toxicidad de los metales puede variar según su valencia y su amalgama con otros elementos. Los contaminantes como los metales pesados también se consideran contaminantes conservativos, ya que no se descomponen por actividades biológicas o por otros mecanismos como la fotodegradación (Jayawardana, 2016).

### *Nitratos*

El nitrato es una de las formas de nitrógeno de mayor interés en las aguas naturales, residuales y residuales tratadas, y se presenta generalmente a nivel de trazas en el agua de superficie, pero puede alcanzar niveles elevados en las subterráneas. Una concentración alta de nitratos es indicio de una etapa mayor de mineralización de los compuestos nitrogenados. En las aguas de algunos pozos suelen encontrarse cantidades apreciables de nitratos, lo que es objetable desde el punto de vista sanitario (Secretaría de Economía, 2023).

### *Dureza total*

Los cationes multivalentes, particularmente magnesio y calcio, a menudo están presentes en concentraciones significativas en aguas naturales. Estos iones se precipitan fácilmente y, en particular, reaccionan con el jabón para formar una nata difícil de eliminar. Para la mayoría de los propósitos prácticos, la dureza del agua se puede representar como la suma de las concentraciones de calcio y magnesio. El equilibrio entre la dureza carbonatada y no carbonatada es importante en el ablandamiento del agua (eliminación de la dureza) y en la formación de incrustaciones (Crittenden, 2012).

### *Sílice*

La sílice está presente en casi todas las rocas, suelos y aguas naturales. En el agua, la sílice se clasifica como  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  ó  $\text{Si}(\text{OH})_4$ , aunque los análisis de agua comúnmente representan sílice disuelta como  $\text{SiO}_2$ . La concentración de sílice que se encuentra más comúnmente en aguas naturales, está entre 1 y 30 mg/L. La solubilidad de la sílice es compleja, pero la temperatura es un factor crítico (Crittenden, 2012).

### *Alcalinidad*

La alcalinidad es una medida de la capacidad de un agua para resistir los cambios en el pH. La alcalinidad en el agua se debe a la presencia de sistemas ácidos débiles que

consumen iones de hidrógeno producidos por otras reacciones o producen iones de hidrógeno cuando son necesarios por otras reacciones, lo que permite que las actividades químicas o biológicas tengan lugar dentro de un agua sin cambiar el pH. La principal fuente de alcalinidad es el sistema de carbonato, aunque los fosfatos, silicatos, boratos, carboxilatos y otros sistemas ácidos débiles también pueden contribuir (Crittenden, 2012).

## 5. Documentos de referencia para la caracterización del agua destilada.

Para establecer las características fisicoquímicas y los métodos experimentales para el análisis de calidad de un agua nivel 1 se consultaron tres documentos oficiales. El documento base fue la FEUM, en éste se encontró el procedimiento experimental para determinar pH, conductividad, sustancias oxidables (equivalente al COT), la determinación de metales pesados y límites microbianos, para este último el procedimiento y validación necesitan reactivos de los que no se dispone en el Laboratorio de Ingeniería Química, por lo cual este parámetro se omitió para este análisis, pero se sugiere considerar la inversión en un futuro, para implementar la técnica de determinación de organismos coliformes totales y *Escherichia coli* o coliformes fecales u organismos termotolerantes, considerando que los indica la FEUM con un límite máximo de los microorganismos antes mencionados de 100 UFC por mililitro.

Como se observa en la tabla 4, los primeros dos métodos son cuantitativos y se miden a través de equipos específicos (potenciómetro y conductímetro), los dos últimos métodos son cualitativos que detectan para sustancias oxidables un máximo de 0.5 ppm y para metales pesados un máximo de 0.1 ppm. Esto es aplicable debido a que el agua nivel 1 producida cuenta con un nivel alto de pureza y no debe de presentar grandes concentraciones de estos contaminantes. El segundo documento mencionado en la tabla 4 son los "Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater, 22nd edition", este documento se consultó ya que la determinación de nitratos dada por la FEUM indicaba una técnica cualitativa por lo que se eligió la técnica cuantitativa del Standard Methods para un análisis numérico de la concentración de este parámetro. El caso de dureza de calcio se consultó en esta publicación, ya que no hay una norma mexicana para la determinación experimental de éste. Por último, para la determinación de los parámetros de dureza total, sílice y alcalinidad se consultaron las normas mexicanas, como se explicó anteriormente el propósito de incluir estos métodos cuantitativos experimentales fue debido al origen del agua de alimentación del proceso, ya que es agua que proviene del pozo de extracción de Química de Ciudad Universitaria (pozo 1), por tanto la FEUM y la normatividad nos indican que estos parámetros se deben

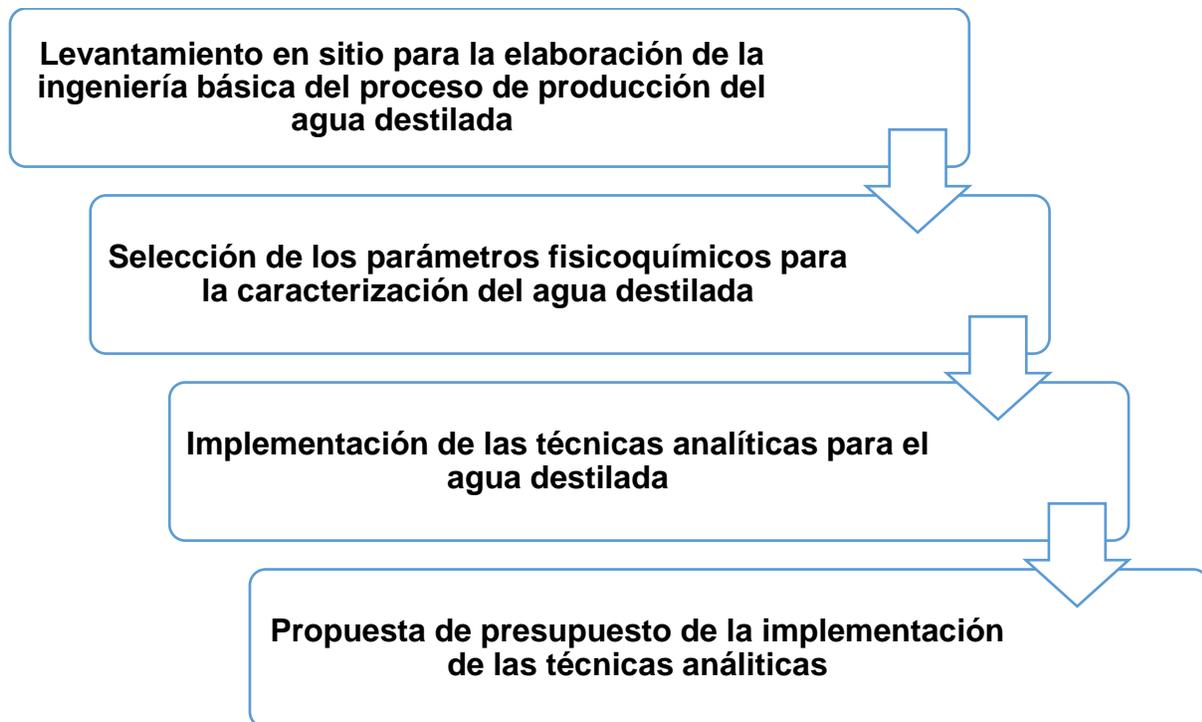
determinar para asegurar que la concentración de sales no afectará tuberías y equipos involucrados en el proceso.

*Tabla 4. Documentos y métodos aplicables para agua nivel 1*

<b>Documento consultado</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Método</b>	<b>Principio del método</b>
Farmacopea de los Estados Unidos Mexicanos	pH	Unidades de pH	Cuantitativo	Detección del potencial a través de un electrodo.
	Conductividad	( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Cuantitativo	Detección de flujo de electrones facilitado con iones a través de un conductímetro.
	Sustancias oxidables	NA	Cualitativo	Oxidación de compuestos orgánicos a través de un método colorimétrico.
	Metales pesados	NA	Cualitativo	Detección de impurezas metálicas a través de un método colorimétrico.
Standard Methods	Nitratos	ppm	Cuantitativo	Detección espectrofotométrica ultravioleta análisis instrumental.
	Dureza de Calcio	mg $\text{CaCO}_3/\text{L}$	Cuantitativo	Valoración por EDTA. Formación de complejos.
NMX-AA-072-SCFI-2001	Dureza total	mg $\text{CaCO}_3/\text{L}$	Cuantitativo	Valoración por EDTA. Formación de complejos.
NMX-AA-075-1982	Sílice	mg $\text{SiO}_2/\text{L}$	Cuantitativo	Detección espectrofotométrica a través de desarrollo de color.
NMX-AA-036-SCFI-2001	Alcalinidad	mg $\text{CaCO}_3/\text{L}$	Cuantitativo	Valoración por HCl, reacción ácido-base.

## 6. Desarrollo experimental.

El desarrollo experimental para el análisis de calidad y proceso de producción se realizó en diferentes etapas como se muestra en el diagrama de la figura 3, se comenzó con el levantamiento en sitio con el que se establecieron los componentes de la ingeniería básica que permitió comprender el proceso y los equipos involucrados en éste. Posteriormente se realizó la búsqueda y selección de los parámetros fisicoquímicos de relevancia para un agua nivel 1; enseguida se implementaron las técnicas analíticas, se realizaron tres muestreos periódicos para el análisis de cada parámetro. Por último, se elaboró una propuesta de presupuesto para la caracterización del agua producida, mismo que incluye la implementación de las técnicas y la realización de muestreos periódicos.



*Figura 3. Diagrama de la secuencia del desarrollo experimental.*

### **6.1. Proceso de producción del agua destilada en la Facultad de Química.**

El Laboratorio de Ingeniería Química se encuentra situado en la Facultad de Química en la cual se imparten actividades de docencia e investigación. El agua destilada producida en el Laboratorio de Ingeniería Química se encuentra almacenada en un tanque horizontal, al cual acuden académicos pertenecientes a toda la Facultad de Química tanto de docencia, investigación y posgrados. La producción de agua destilada se realiza con base a un calendario establecido al inicio del semestre, aprovechando el periodo cuando en la docencia se utiliza vapor para que éste se emplee también en la producción de agua destilada; en un periodo escolar de 16 semanas se produce mínimo una vez por semana y el proceso de producción dura de 5 a 6 horas.

Se realizó un levantamiento en sitio con la finalidad del entendimiento del proceso, así como el conocimiento de los equipos involucrados y el límite de batería del proceso. El levantamiento en sitio se realizó como un recorrido de todo el proceso para la generación de agua destilada en el Laboratorio de Ingeniería Química. A partir del levantamiento en sitio, se elaboraron los siguientes documentos: la filosofía de operación, el diagrama de flujo de proceso, el balance de materia y energía, la hoja de datos de los equipos y el diagrama de tubería e instrumentación; con ayuda de estos componentes se interpretó de forma concreta el concepto de producción del agua destilada en el laboratorio.

### **6.2. Selección de los parámetros fisicoquímicos para la caracterización del agua destilada.**

Se realizó una búsqueda sobre la definición de un agua nivel 1, los parámetros que se deben considerar para determinar la calidad para este tipo de agua, así como sus máximos valores dados por cada documento consultado. Esta búsqueda se realizó en diferentes documentos internacionales como la ASTM D1193-06, ISO 3696 y la Farmacopea de los Estados Unidos Mexicanos. Finalmente se consideró tomar la definición establecida en la ASTM ya que como se mencionó en el marco teórico, este tipo de agua se obtiene a partir de la destilación y este proceso es el que se lleva a cabo en el Laboratorio de Ingeniería Química. Para el caso de los valores máximos y los parámetros a analizar se decidió ocupar lo citado en la Farmacopea para un agua nivel

1, que es análoga al agua tipo II. Los parámetros seleccionados son los citados en la Farmacopea que se mencionan a continuación:

- pH
- Conductividad
- Sustancias oxidables
- Metales pesados
- Nitratos
- Dureza
- Sílice
- Alcalinidad

Esta búsqueda y selección para cada procedimiento experimental se menciona de manera resumida en la tabla 5, en donde se enfatiza la normatividad aplicada de cada parámetro a determinar. Para la caracterización de los primeros cuatro parámetros, se consideraron los procedimientos experimentales establecidos para un agua nivel 1 de la Farmacopea, y para la determinación de nitratos se omitió el procedimiento descrito en la misma debido a que es una técnica cualitativa y en el proceso de búsqueda se decidió considerar el procedimiento cuantitativo descrito en el Standard Methods.

El agua cruda utilizada para la producción de agua destilada proviene del pozo de Ciudad Universitaria, por lo que se decidió añadir a la búsqueda y selección de procedimientos experimentales la determinación de dureza total, dureza de calcio, sílice y alcalinidad. Para este caso se siguieron los procedimientos establecidos en las normas mexicanas vigentes, y debido a que no existe una norma mexicana dedicada a dureza de calcio, el procedimiento experimental seleccionado se obtuvo del Standard Methods, para así identificar si la dureza total encontrada está relacionada a trazas de calcio o magnesio. Por último, el criterio de límites máximos permisibles para el agua cruda se obtuvo de la NOM-127-SSA1-2021.

*Tabla 5. Selección de parámetros, referencia o normatividad aplicada para la caracterización del agua destilada*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Referencia o normatividad aplicada</b>
pH	Unidades de pH	MGA 0701 de la Farmacopea 2018
Conductividad	μS/cm	MGA 0196 de la Farmacopea 2018
Sustancias oxidables	NA	Apartado para uso agua nivel 1 de la Farmacopea 2018
Metales pesados	NA	Apartado para uso agua nivel 1 de la Farmacopea 2018
Nitratos	ppm	4500-NO3- B de Standard Methods
Dureza total	mg CaCO <sub>3</sub> /L	NMX-AA-072-SCFI-2001
Dureza de calcio	mg CaCO <sub>3</sub> /L	3500-Ca B de Standard Methods
Sílice	mg SiO <sub>2</sub> /L	NMX-AA-75-1982
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> /L	NMX-AA-036-SCFI-2001

### **6.3. Implementación de las técnicas analíticas para agua destilada.**

Se elaboró un manual de técnicas analíticas exclusivo para el análisis de agua destilada producida en el Laboratorio de Ingeniería Química; la portada y contenido de éste se muestran en el anexo 5. Se estableció un mínimo de contenido, que consideró, objetivo, alcance del procedimiento, lista de reactivos, material y equipo utilizado, descripción del procedimiento experimental, sección de cálculos y diagrama de tratamiento de residuos. En el caso de pH, conductividad, nitratos y sílice se adicionaron anexos referentes a la calibración de los equipos, como el multiparamétrico para lectura de pH y conductividad, además de las curvas de calibración para el método espectrofotométrico. Complementando este manual, se elaboró un diagrama de flujo para cada parámetro que incluyó solamente el procedimiento experimental resumido.

En la Figura 4 se muestra el procedimiento experimental para la determinación de pH en un agua nivel 1; éste se desarrolló de acuerdo con el método general de análisis MGA 0701 de la Farmacopea, el cual indica un método potenciométrico a través de la

detección de actividad de iones hidrógeno, particularmente se realizó por medio de un electrodo de vidrio conectado a un multiparamétrico de marca OAKTON PC 2700 pH/mV/Conductivity/°C/°F meter. Por lo tanto, el equipo se verificó y calibró utilizando tres soluciones amortiguadoras (pH: 7,4 y 10), este procedimiento se menciona en la figura 5.

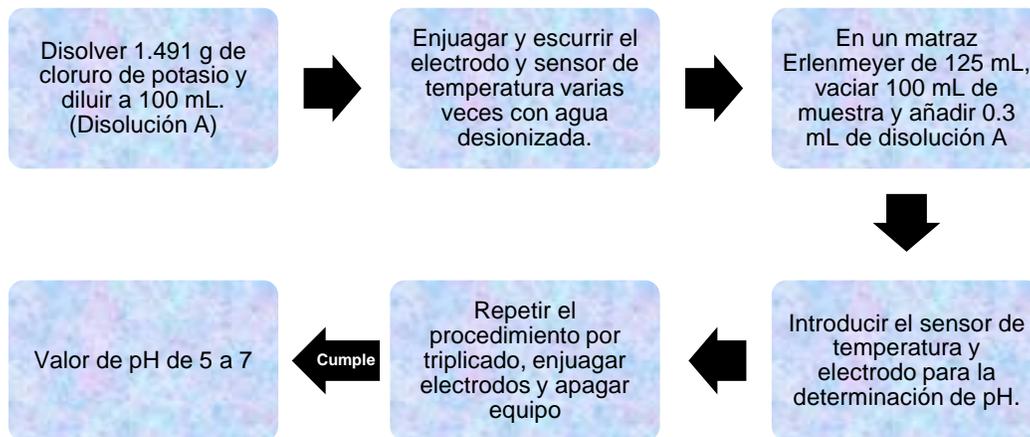


Figura 4. Diagrama de flujo para la determinación de pH.

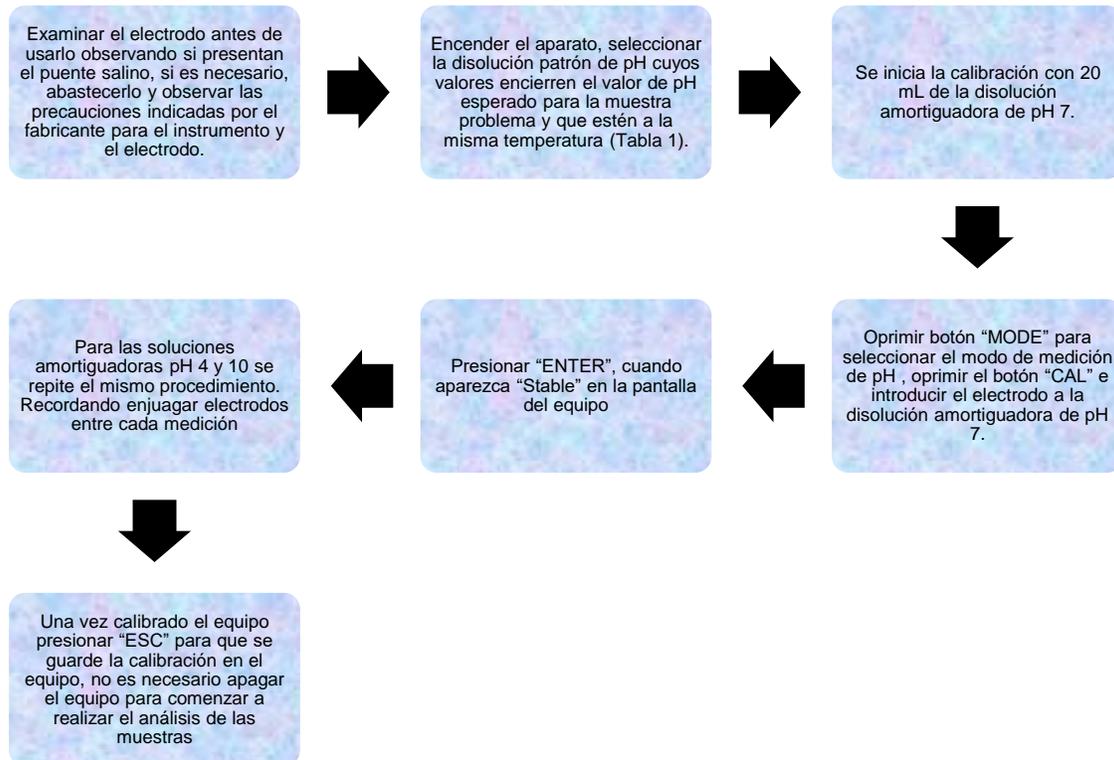


Figura 5. Diagrama de flujo para la calibración del multiparamétrico para la determinación de pH

En la figura 6 se presenta el proceso para la determinación de la conductividad para un agua nivel 1; este parámetro se realizó de acuerdo con el método general de análisis MGA 0196 de la Farmacopea, el cual consiste en la detección de la conductividad eléctrica a través de 3 etapas condicionantes o también llamada prueba de conductividad en línea, se utilizó una celda de conductividad conectada a un multiparamétrico de marca OAKTON PC 2700 pH/mV/Conductivity/°C/°F meter.

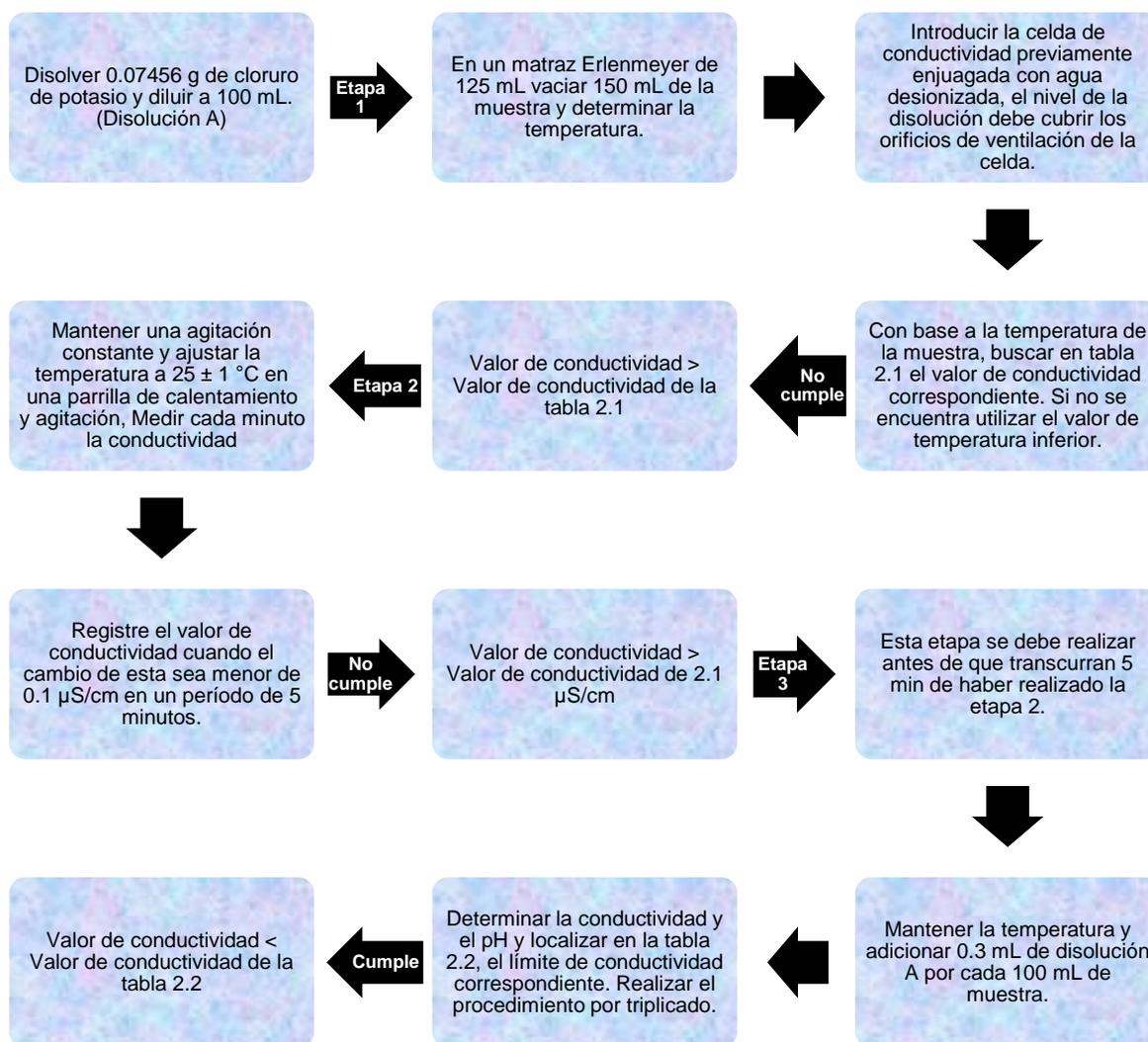
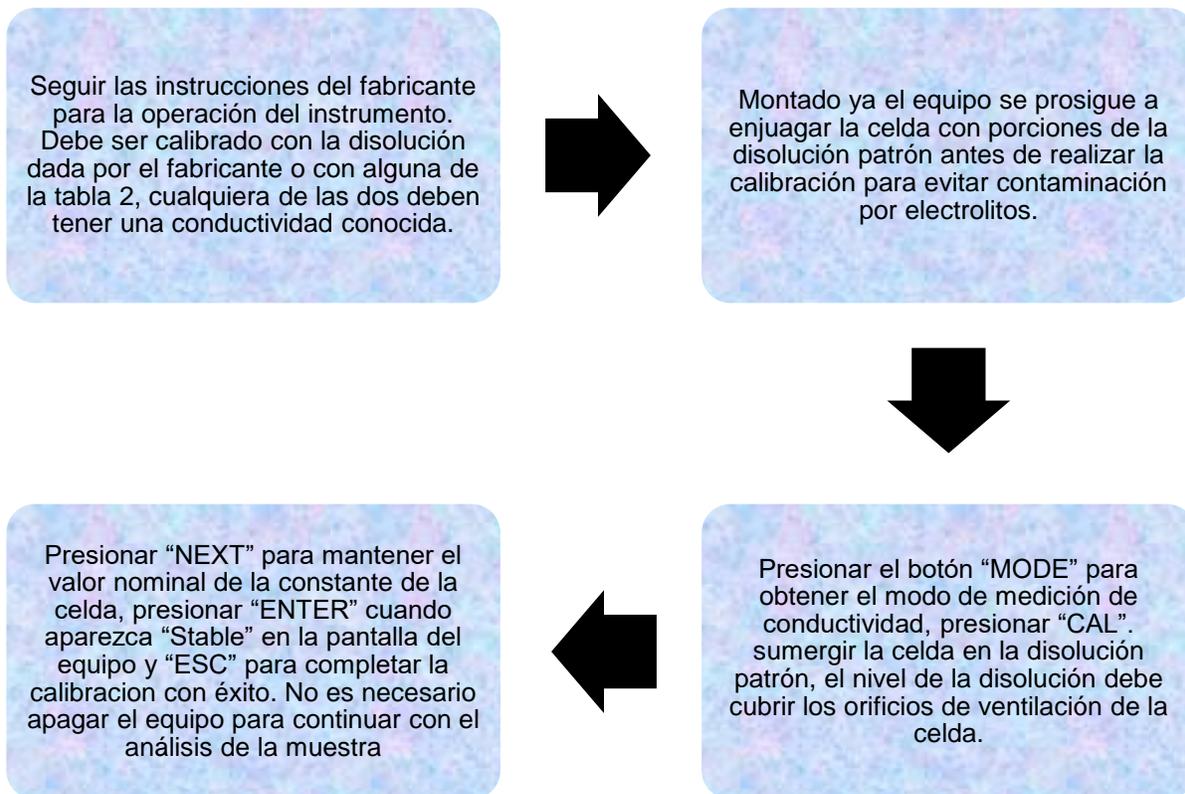


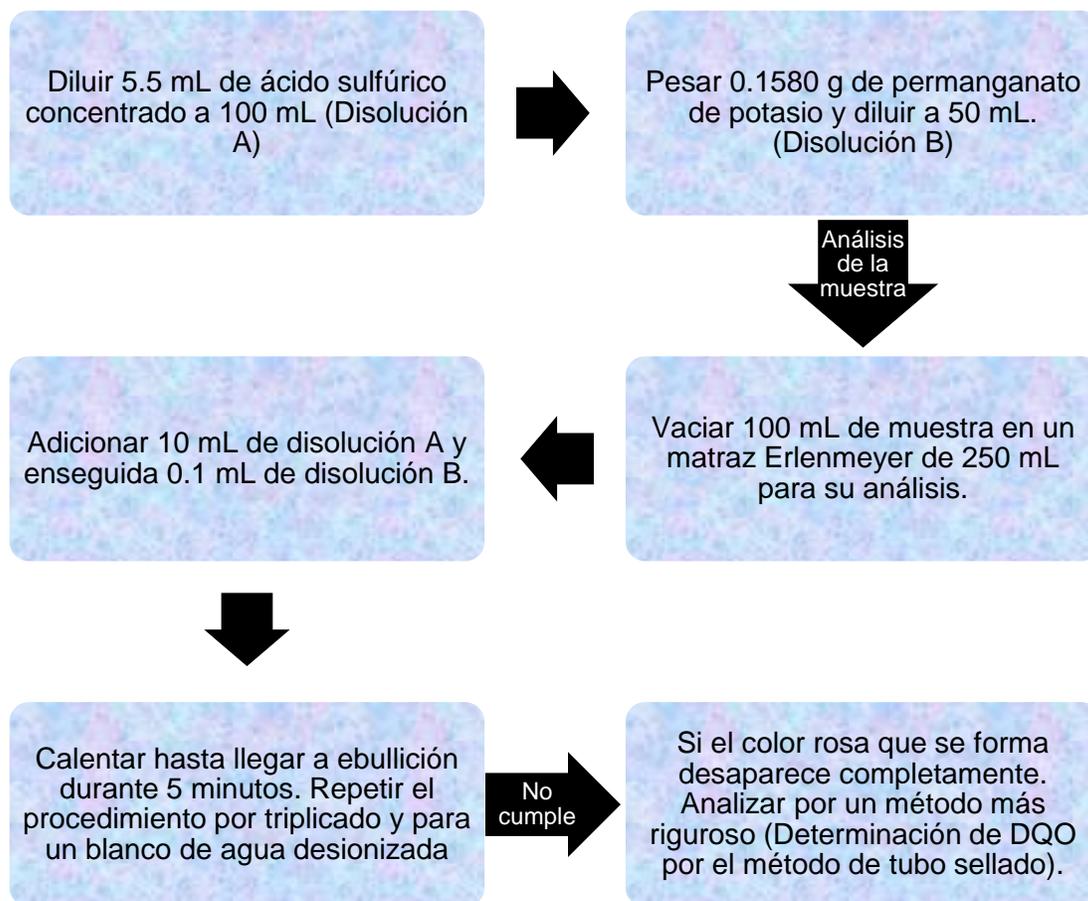
Figura 6. Diagrama de flujo para la determinación de conductividad.

El funcionamiento del equipo (celda de conductividad) se verificó y calibró con una disolución estándar de cloruro de potasio que englobó el rango de lectura de conductividad del equipo, este procedimiento se menciona en la figura 7.



*Figura 7. Diagrama de flujo para la calibración del multiparamétrico para la determinación de la conductividad*

En la figura 8 se indica el procedimiento para la determinación de sustancias oxidables para un agua nivel 1; éste se realizó de acuerdo con el método estipulado en el apartado de sistemas críticos para un agua purificada nivel 1 de la Farmacopea. Las sustancias orgánicas son oxidadas a través de la adición de ácido sulfúrico, mediante calentamiento y la adición de un indicador colorimétrico se observa la nula presencia de materia orgánica en la muestra al mantener el color rosado formado, y si este desaparece se sugiere ocupar un método más riguroso señalado en la NMX-AA-030/2-SCFI-2011. El método estipulado en la Farmacopea es equivalente a la determinación de carbono orgánico total con un límite máximo de detección de materia orgánica de 0.5 ppm.



*Figura 8. Diagrama de flujo para la determinación de sustancias oxidables.*

En la figura 9 se expone el procedimiento experimental para la determinación de metales pesados para un agua nivel 1; el método se extrajo de la sección de sistemas críticos para un agua purificada nivel 1 de la Farmacopea, es un método colorimétrico en el que se somete la muestra a un medio ácido y a la adición de una solución de referencia provocando una coloración verde pardo en presencia de metales pesados tales como el plomo, mercurio, plata, bismuto, arsénico, antimonio, estaño, cobre y molibdeno con un límite máximo de detección de 0.1 ppm.

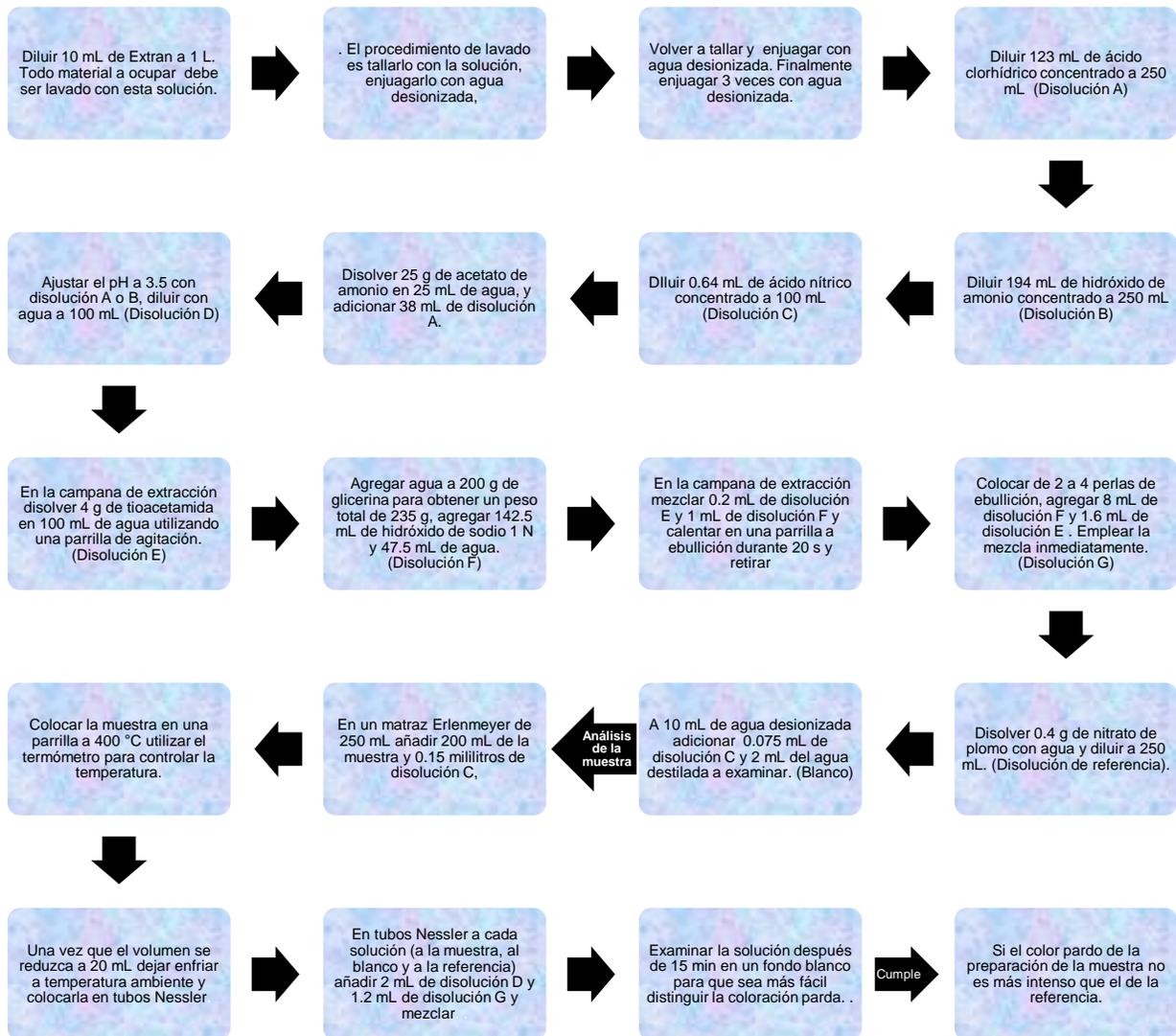


Figura 9. Diagrama de flujo para la determinación de metales pesados.

En la figura 10 se señala el procedimiento experimental para la determinación de nitratos para un agua nivel 1; este parámetro se elaboró conforme al método de detección espectrofotométrica ultravioleta 4500-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> del Standard Methods.

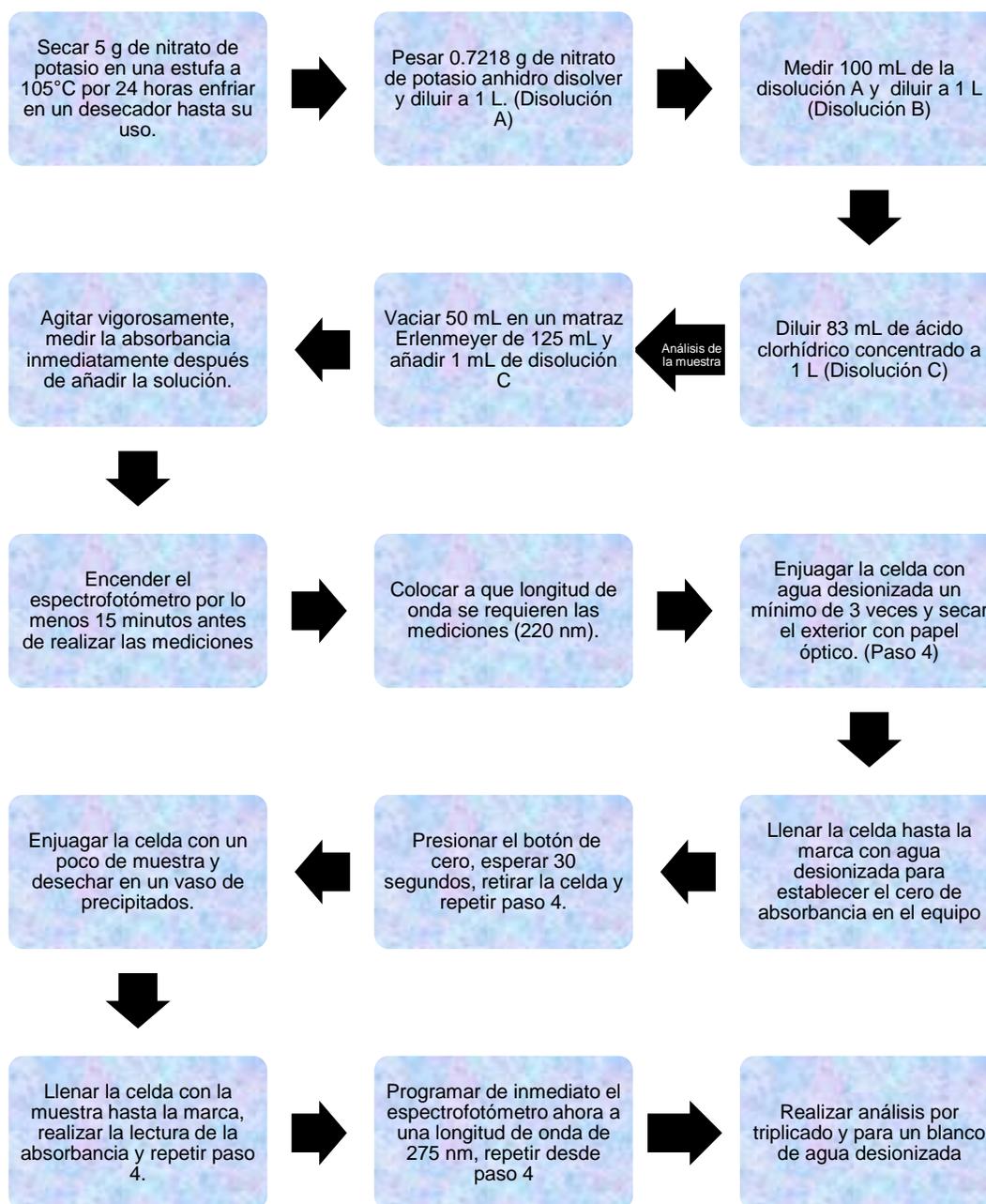
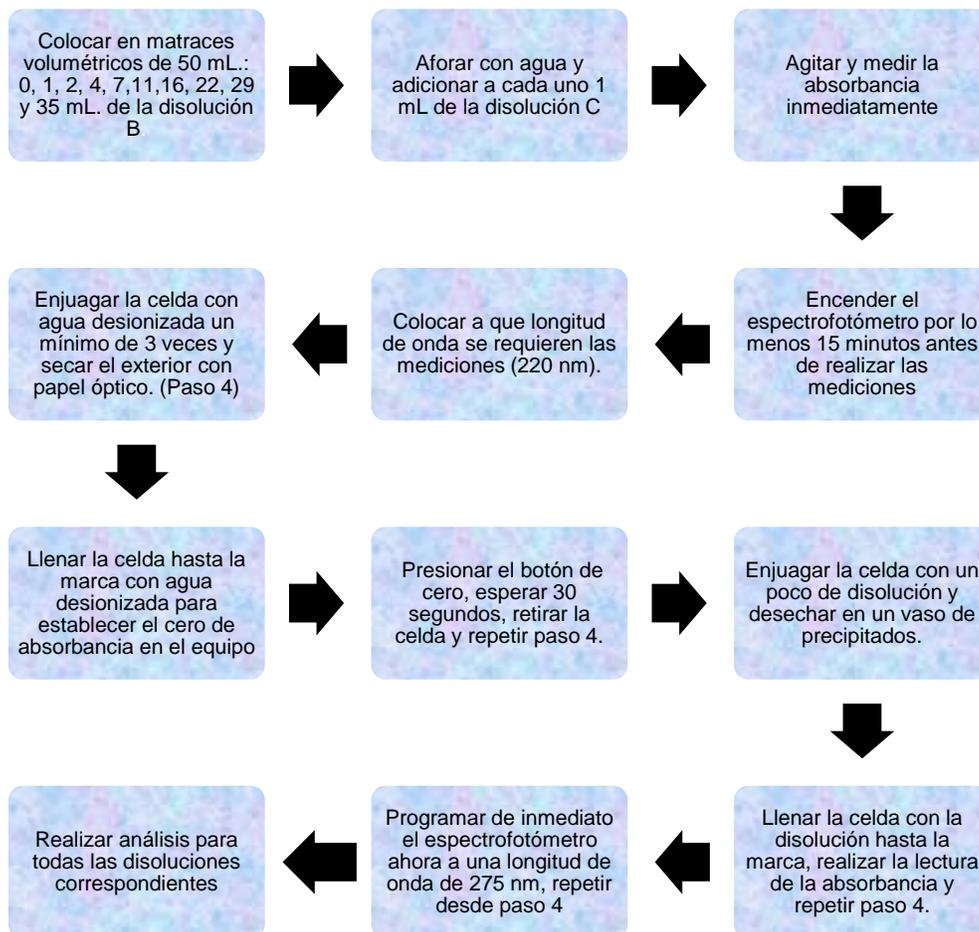


Figura 10. Diagrama de flujo para la determinación de nitratos.

La detección de nitratos se realizó ocupando un espectrofotómetro Genesys 10S UV-VIS de marca Thermo Scientific, el método consiste en someter la muestra a un medio ácido para la detección de la absorbancia que provoca el ion nitrato a una longitud de onda de 220 nm. Una interferencia en el método es la concentración alta de materia orgánica, por lo tanto, ésta se detecta a una longitud de onda de 275 nm y de ser necesario se calcula una absorbancia corregida, por medio de la construcción de una curva de calibración

mencionada en la figura 11, con lo que se obtiene la ecuación de conversión de absorbancia a concentración de nitratos en mg/L.



*Figura 11. Diagrama de flujo para la curva de calibración para la determinación de nitratos.*

En la figura 12 se observa el procedimiento experimental para la determinación de dureza total; ésta se realizó de acuerdo con la norma mexicana NMX-AA-072-SCFI-2001. La técnica mencionada es una valoración que favorece la formación de complejos adicionando a la muestra una solución amortiguadora, un indicador colorimétrico específico y como titulante EDTA, esta reacción forma complejos que producen un color rojizo vino en presencia de iones de calcio y/o magnesio o un color azul marino si no contiene altas concentraciones de estos.



Figura 12. Diagrama de flujo para la determinación de dureza total.

La teoría indica que la dureza total es la suma de la dureza causada por los iones calcio y magnesio; en la figura 13 se muestra el procedimiento experimental para la determinación de dureza de calcio, la cual se desarrolló de acuerdo con el método de titulación por EDTA 3500-Ca B del Standard Methods. De igual forma la técnica es una valoración de formación de complejos adicionando a la muestra una solución amortiguadora, un indicador específico y el titulante EDTA, esta reacción forma complejos que en presencia del ion calcio provocan una coloración rosada y una coloración morada si no existe presencia de este ion. Con los resultados obtenidos de estas metodologías se obtiene por diferencia el valor de dureza de magnesio que puede existir en la muestra.

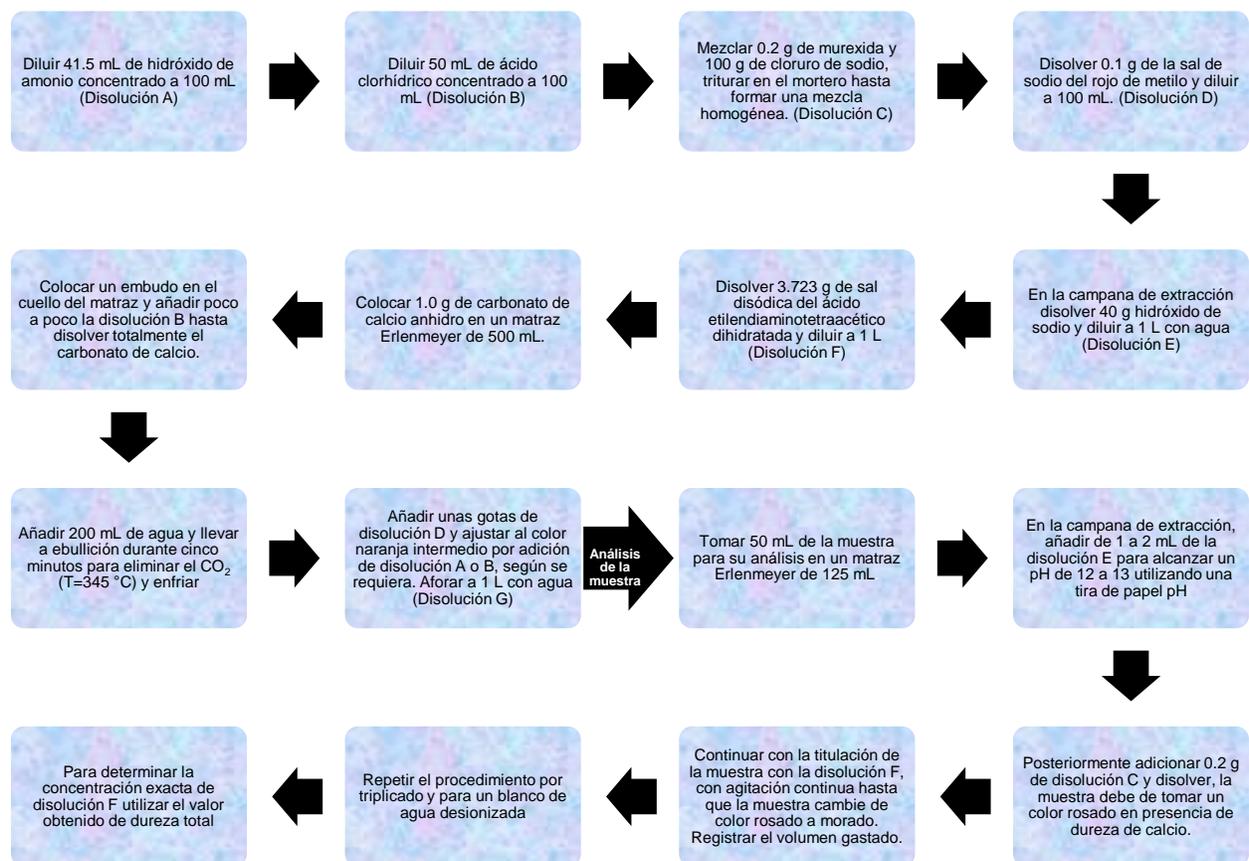


Figura 13. Diagrama de flujo para la determinación de dureza de calcio.

En la figura 14 se indica el procedimiento experimental para la determinación de sílice; éste se realizó de acuerdo con la norma mexicana NMX-AA-75-1982. La concentración de sílice se determinó ocupando un espectrofotómetro Genesys 10S UV-VIS de marca Thermo Scientific. La técnica consiste en someter la muestra a un pretratamiento con bicarbonato de sodio y baño de vapor para llevar toda la sílice a su forma reactiva, posteriormente se expone a un medio ácido para su consecuente reacción mediante la adición de molibdato de amonio generando una formación de ácidos heteropolares que al contacto con la adición de ácido oxálico, reaccionan y generan un color verde amarillento en la presencia de sílice y un verde claro en bajas concentraciones de dicho compuesto; una vez formado el color se prosigue a la lectura de la absorbancia y

mediante una construcción de curva de calibración mencionada en la figura 15 se realiza la ecuación de conversión de absorbancia a concentración de sílice en mg/L.

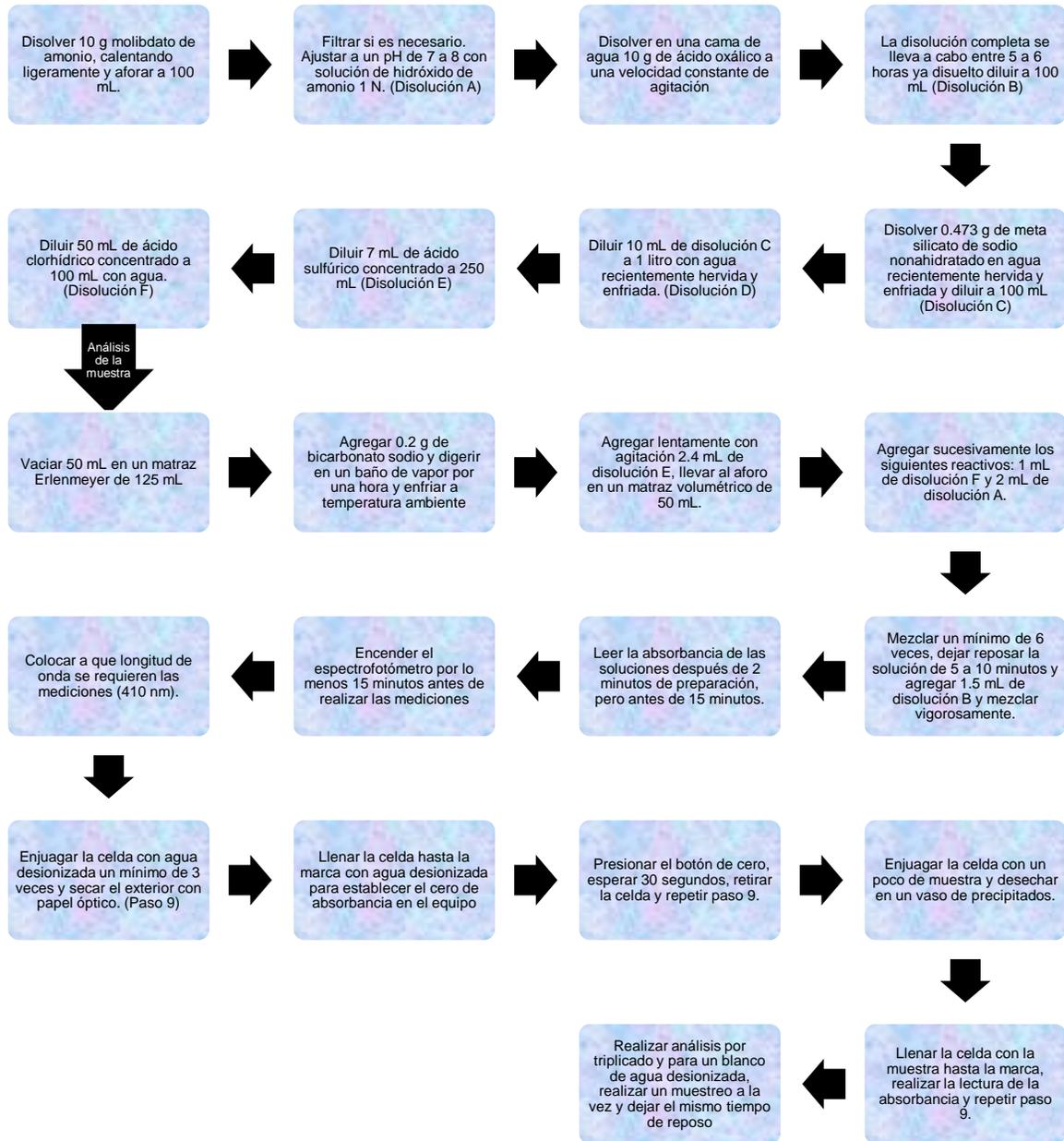
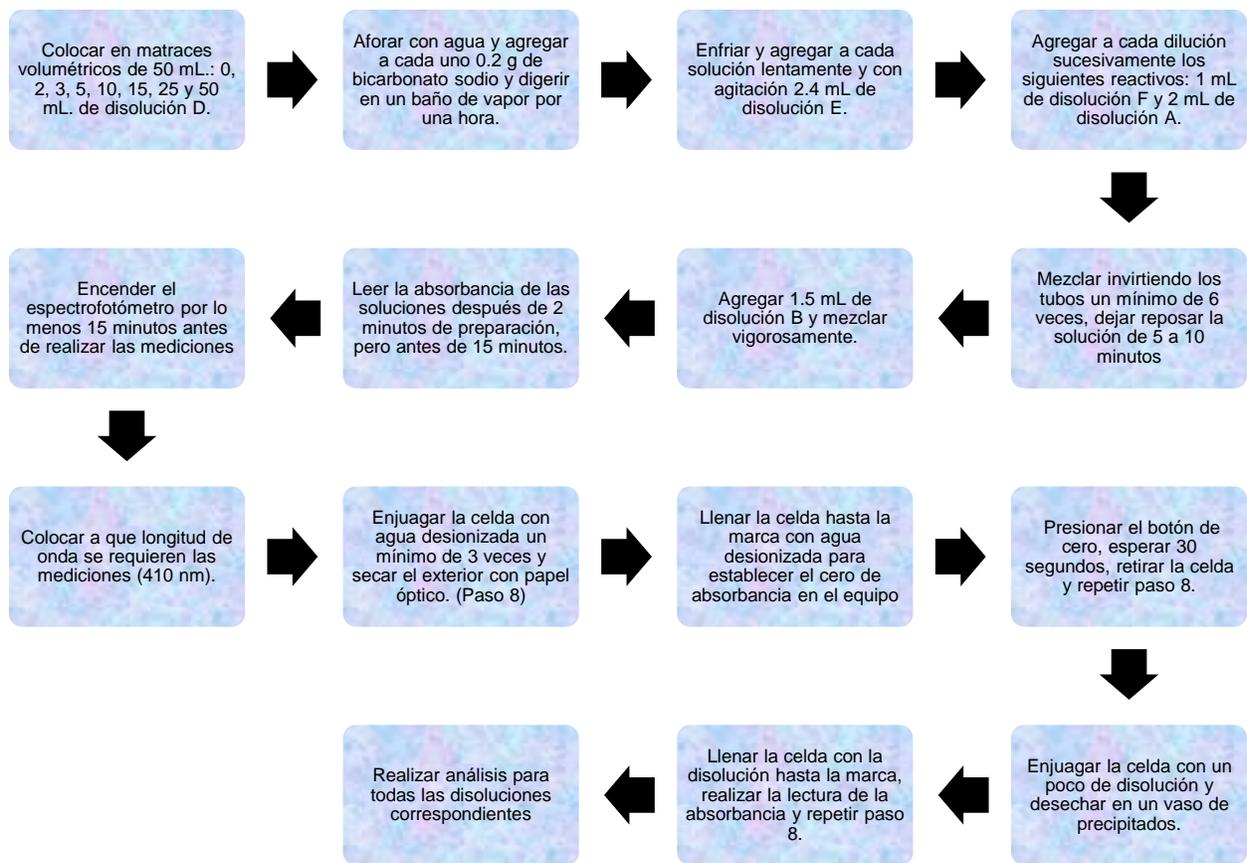


Figura 14. Diagrama de flujo para la determinación de sílice.



*Figura 15. Diagrama de flujo para la construcción de la curva de calibración para la determinación de sílice.*

En la figura 16 se presenta el procedimiento experimental para la determinación de alcalinidad; esta se llevó a cabo de acuerdo con la norma mexicana NMX-AA-036-SCFI-2001, la cual indica un método de valoración ácido-base ocupando dos indicadores coloridos (fenolftaleína y naranja de metilo) y como titulante ácido clorhídrico. La concentración total de alcalinidad es obtenida a partir del volumen total gastado en los dos cambios de color, ésta es obtenida en mg/L de  $\text{CaCO}_3$ .

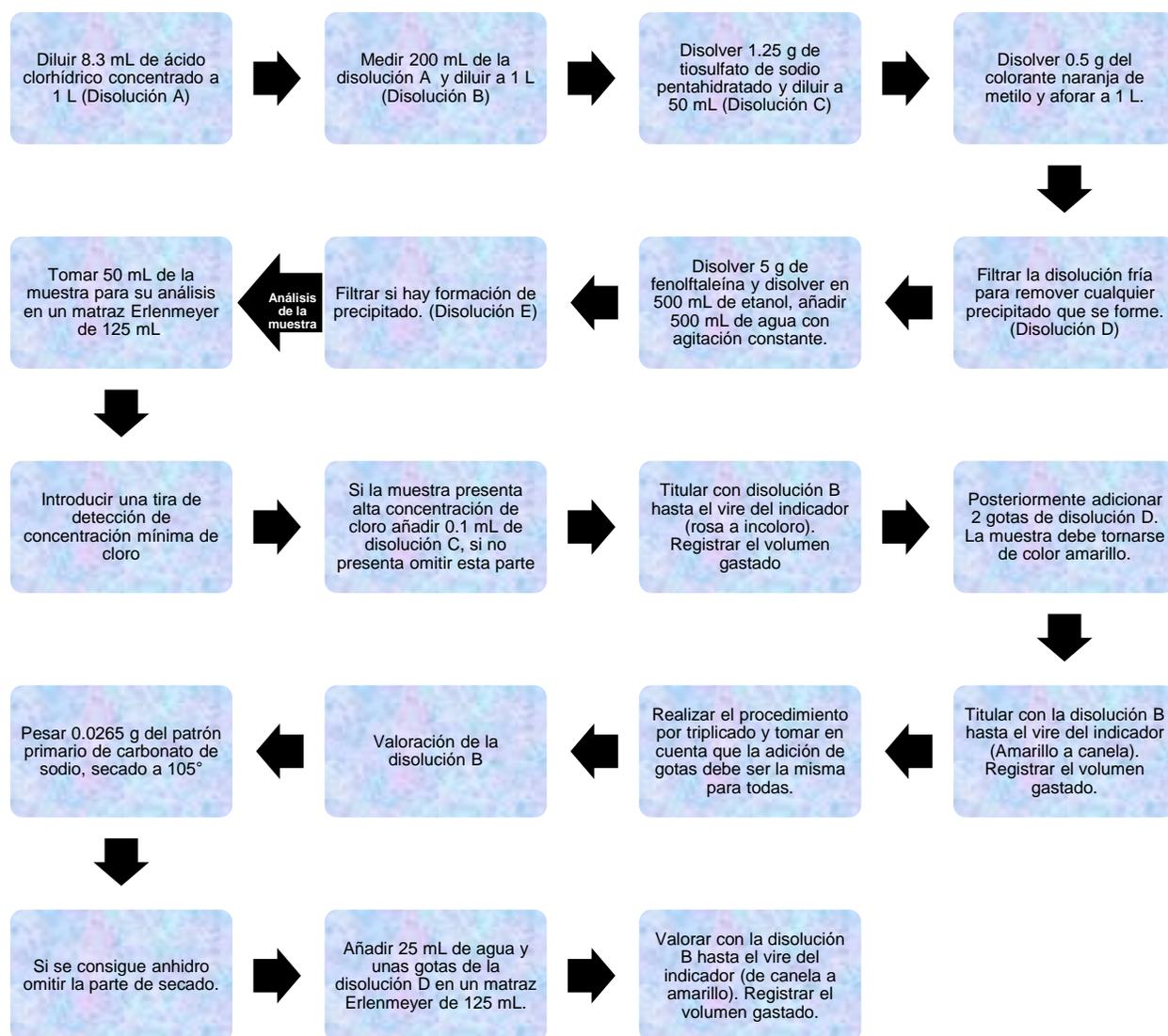


Figura 16. Diagrama de flujo para la determinación de alcalinidad.

#### 6.4. Presupuesto para la implementación de técnicas analíticas para la caracterización de agua destilada.

Se consultaron cotizaciones de reactivos, material y equipo correspondientes a cada parámetro establecido. Para los reactivos se solicitó cotización al proveedor de la Facultad de Química con el fin de obtener costos del año actual 2023. Para el caso de los equipos se solicitó las cotizaciones a la Coordinación de Protección Ambiental, éstas son del año 2021 para lo cual se consideró agregar a los precios la inflación correspondiente al año de su cotización. Esto fue para el caso de algunos equipos, pues

para los equipos faltantes se solicitó cotización al proveedor para obtener costos actualizados al año 2023.

El presupuesto que se realizó a partir de estas cotizaciones estimó la cantidad de insumos necesarios para cada parámetro a determinar considerando que el análisis de cada técnica se realiza por triplicado, logrando obtener una estimado económico del uso de reactivos por parámetro unitario, así como una estimación mensual y anual considerando muestreos periódicos mensuales. En el caso del material, se consideró la depreciación de los materiales de acuerdo con los parámetros de estimación de vida útil indicados en el Diario Oficial de la Federación. En el caso de los equipos se decidió estimar un porcentaje de depreciación del 10 % y omitir el costo de los equipos que ya están instalados en el Laboratorio de Ingeniería Química y son de uso común, estos son: el espectrofotómetro, la balanza analítica, el horno y el desecador, por lo que sólo se contempló el costo del multiparamétrico, las micropipetas, parrilla de calentamiento y agitación, agitador magnético, tiras indicadoras y termómetro, por lo cual la inversión por equipos se vio disminuida por las excepciones antes mencionadas.

## **7. Resultados y análisis.**

### **7.1. Ingeniería básica del proceso de producción del agua destilada.**

#### **7.1.1. Filosofía de operación.**

La filosofía de operación del proceso de producción del agua destilada que se muestra en el diagrama de la figura 17, consta de dos materias primas: agua y vapor de agua, dos etapas de operación: evaporación y condensación y la generación del producto principal que es el agua destilada y un producto secundario que es agua caliente proveniente de la segunda etapa. El proceso de destilación en el Laboratorio de Ingeniería Química se genera cada semana en el periodo de docencia y su duración va de 5 a 6 horas para abastecer el tanque de almacenamiento y distribución. En el caso de periodo de exámenes finales, extraordinarios e inscripciones, el proceso de generación es de cada dos o tres semanas ya que sólo se necesita para las actividades de investigación o servicio social, por lo que la demanda de agua destilada disminuye.



*Figura 17. Diagrama de la filosofía de operación para la producción de agua destilada.*

La principal materia prima es el agua cruda, que como se mencionó anteriormente proviene del pozo 1 de Ciudad Universitaria, este abastecimiento es constante ya que no sólo alimenta al proceso sino a todo el Laboratorio de Ingeniería Química. Este suministro sólo es intermitente cuando existe mantenimiento del pozo, en este caso entra en operación una línea auxiliar del agua almacenada por parte de la Facultad de Química.

La segunda materia prima es el vapor de agua que proviene del servicio auxiliar del proceso que es la caldera ubicada en el Laboratorio de Ingeniería Química. La generación de vapor se realiza a partir del agua cruda, ésta es sometida a un pretratamiento de zeolitas para evitar incrustaciones de sales que puedan afectar el funcionamiento de la caldera a largo plazo. Este equipo genera el vapor de agua a través del calentamiento por medio de Gas LP y sólo funciona durante la generación del agua destilada o cuando algún otro equipo del Laboratorio de Ingeniería Química lo requiera para el ámbito de docencia.

La primera etapa de generación del agua destilada es la evaporación del agua del proceso a través de un evaporador de calandria, el propósito de esta etapa es llevar hasta ebullición la materia prima (agua) para eliminar toda impureza como lo son sales, trazas de metales y materia orgánica. El fluido de servicio o medio de calentamiento es el vapor de agua que proviene de la caldera e ingresa por la coraza del equipo y el fluido principal es el agua del proceso que ingresa por los tubos del equipo. Adicionalmente este equipo cuenta con una recirculación, ésta regresa el vapor condensado (agua caliente) del fluido de servicio de nuevo a la calandria, ingresando por los tubos del equipo con la finalidad de aumentar la eficiencia del equipo.

La segunda etapa consta de la condensación en un intercambiador de coraza y tubos, donde el fluido principal es el vapor de agua obtenido en la etapa anterior, éste ingresa por la coraza del equipo y el medio de enfriamiento o fluido de servicio es el agua cruda que ingresa por los tubos del condensador. A partir del proceso de condensación se obtiene el condensado principal que es el agua destilada y la salida del medio de enfriamiento que en este caso es agua caliente.

Los productos obtenidos a partir de la segunda etapa son el agua destilada que es el producto principal, éste ingresa a un tanque horizontal para su almacenamiento y distribución a los diversos laboratorios de investigación y docencia. El producto secundario es el fluido de servicio del condensador el cual es agua caliente que se desecha directamente al drenaje de la Facultad de Química.

### 7.1.2. Diagrama de flujo de proceso.

En la figura 18 se muestra el diagrama de flujo de proceso para la producción del agua destilada en el Laboratorio de Ingeniería Química y en la tabla 5 se indica la leyenda de este; el proceso inicia en la corriente 5, ésta contiene el agua de alimentación que proviene del pozo 1 de Ciudad Universitaria, y como se indica en el diagrama se divide en 3 corrientes, la corriente 20 que alimenta al evaporador de calandria, la corriente 6 que se subdivide en la corriente 27 que alimenta al condensador y la corriente 7 que alimenta a la caldera.

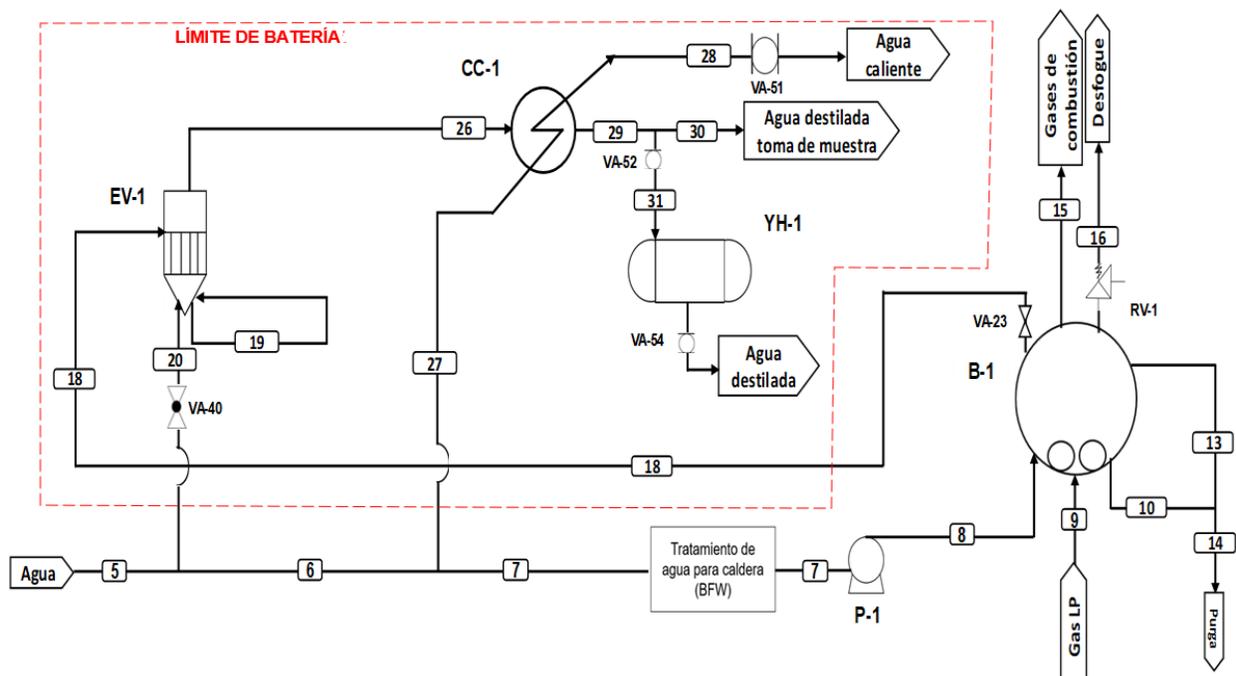


Figura 18. Diagrama de Flujo de Proceso para la producción de agua destilada.

Tabla 6. Leyenda del DFP.

Abreviatura	Definición
VA	Válvula
P	Bomba
B	Caldera
RV	Válvula de seguridad o alivio
EV	Evaporador
CC	Condensador
YH	Tanque horizontal
—	Tubería de proceso

El equipo B-1 es la caldera, esta sección se considera un servicio auxiliar fuera del límite de batería, pues aquí se produce solamente el servicio de calentamiento (vapor de agua) que necesita el evaporador de calandria. La caldera consta de la entrada de agua (corriente 7), ésta es sometida a un tratamiento riguroso de zeolitas para evitar incrustaciones en el equipo debido a un alto contenido de sales, que como se observó en los resultados del análisis químico, el agua de alimentación contiene una alta cantidad de bicarbonatos y silicatos. Posterior al tratamiento es bombeada (P-1) para su entrada a la caldera (corriente 8), el agua se somete a calentamiento hasta ebullición para la generación de vapor (corriente 18). La válvula 23 debe estar abierta al momento del proceso para que el vapor se distribuya al evaporador de calandria. La fuente de calor de la caldera se obtiene de la combustión de gas LP (corriente 9) y los gases de combustión son desechados a la atmósfera por la corriente 15. La corriente 16 es un desfogue que se controla por medio de una válvula de alivio o de seguridad, ésta se activa si la presión de operación de la caldera rebasa los  $6 \text{ kg/cm}^2$  liberando el vapor en exceso que provoca el aumento de presión. La corriente 14 es una purga de la caldera que solamente funciona cuando se requiere purgar el condensado que no se llega a evaporar y se queda en el fondo del equipo, éste se libera directo al drenaje.

El equipo EV-1, es el evaporador de calandria, su función es evaporar el agua de alimentación para después subir al CC-1 donde se condensará para obtener el agua destilada. El evaporador funciona con la configuración siguiente: por los tubos se encuentra el agua y por coraza se encuentra el vapor. La corriente 20 indica la entrada del fluido principal que es el agua fría de alimentación; esta entrada es intermitente pues sólo se abre la válvula VA-40 al inicio del proceso, y una vez que el indicador de nivel del equipo alerta que éste se encuentra lleno se cierra, pero se vigila que se mantenga el nivel de agua, de ser necesario se abre nuevamente; ésta es el agua que se evapora y se condensa para obtener el agua destilada. La corriente 18 es la entrada del fluido de servicio que es el vapor que proviene del equipo B-1, su función es calentar el agua de la corriente 20 hasta ebullición; el condensado de vapor formado, es recirculado como se muestra en la corriente 19, éste ingresa nuevamente pero ahora por los tubos, esto con el propósito de aumentar la eficiencia del evaporador, ya que ahora no se estaría

evaporando agua fría sino agua caliente lo que optimiza el proceso. Por último, la corriente 26 contiene el vapor que se condensó para generar el agua destilada.

El equipo CC-1 es un condensador horizontal, en donde su configuración es la siguiente: por coraza se encuentra el vapor y por tubos se encuentra el servicio de enfriamiento (agua). Este equipo tiene 2 entradas, la primera es la corriente 27, ésta es el servicio de agua de enfriamiento cuyo origen proviene de la división de la corriente 5, y su función es condensar el vapor. La segunda entrada es el vapor que proviene del equipo EV-1, éste ingresa para condensarse. La primer salida del condensador es la corriente 28, ésta es el agua caliente que proviene del servicio de enfriamiento, y es desechada al drenaje abriendo la válvula VA-51. La segunda salida es la corriente 29 que contiene el producto final de este proceso: el agua destilada; esta corriente se divide en la corriente 30 y 31; la primera es una salida que sólo se activa si se cierra la VA-52, y tiene la finalidad de obtener la muestra del agua destilada antes de ingresar al tanque de almacenamiento. La segunda es la que directamente alimenta al YH-1, éste es el tanque de almacenamiento y distribución del agua destilada, la cual se obtiene al abrir la válvula VA-54.

### **7.1.3. Diagrama de tubería e instrumentación.**

En la figura 19 se muestra el diagrama de tubería e instrumentación y en la tabla 7 se muestra la leyenda correspondiente; elaborado a través del levantamiento en sitio realizado en el Laboratorio de Ingeniería Química. Este documento nos abre paso para la ingeniería de detalle, por lo que se elaboró para entender y analizar minuciosamente el proceso de generación del agua destilada; como se mencionó en el DFP, las entradas y salidas de las materias primas y productos son las mismas, pero ahora se analizarán desde la perspectiva a detalle. La simbología de equipos se obtuvo de Ludwig (2007), la nomenclatura y simbología faltante de algunos equipos se obtuvo de Villagrán (2023), ésta fue aplicada para la elaboración del DTI y el DFP.

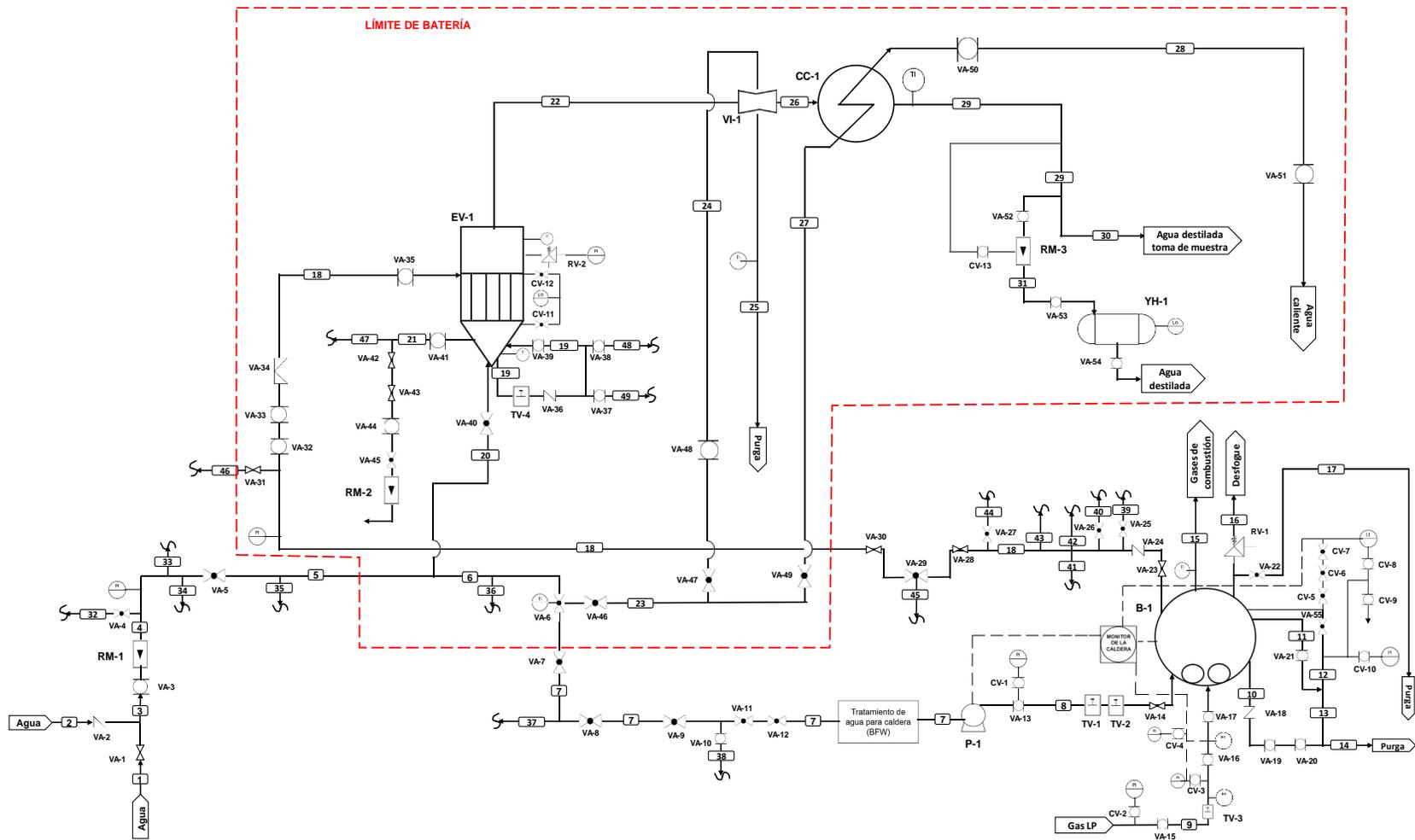


Figura 19. Diagrama de tubería e instrumentación para la producción de agua destilada

Tabla 7. Leyenda del DTI

Abreviatura	Definición
VA	Válvula
RM	Rotámetro
P	Bomba
CV	Válvula de control
TV	Trampa de vapor
B	Caldera
RV	Válvula de seguridad o alivio
VI	Venturi
EV	Evaporador
CC	Condensador
YH	Tanque horizontal
PI	Indicador de presión
TI	Indicador de temperatura
FI	Indicador de flujo
LI	Indicador de nivel
LG	Indicador de vidrio de nivel
————	Tubería de proceso
— —	Señal eléctrica
————	Suministro a instrumentos; conexión a proceso

Como se indica en la figura 19, la corriente 1 contiene agua que proviene del pozo 1 de Ciudad Universitaria, la corriente 2 es una línea que sólo se habilita cuando el pozo 1 se encuentra en mantenimiento, por tanto, la mayor parte del año se mantiene cerrada la VA-2. La corriente 3 es igual a la corriente 1, esta línea abastece no sólo al proceso de generación del agua destilada sino a todo el Laboratorio de Ingeniería Química; el flujo de agua de abastecimiento es conocido a través del rotámetro RM-1; adicionalmente para conocer la presión de entrada de esta línea se ubica un medidor de presión. Debido a que la corriente 3 es una línea compartida, las corrientes 32, 33, 34, 35, 36, 37 y 38 son salidas secundarias que alimentan a otros equipos en el Laboratorio de Ingeniería Química, por tanto, se encuentran fuera del límite de batería del proceso. Las corrientes que se dividen de la línea 5 y que son de interés para el proceso son la corriente 20 que alimenta al EV-1, la corriente 23 que alimenta al CC-1, y la corriente 7 que alimenta a la caldera.

El servicio auxiliar de este proceso es el vapor que se alimenta al evaporador de calandria, éste es producido en el equipo B-1, que se aprecia de forma resumida en la figura 20, y consta de dos entradas y de cinco salidas. La primera entrada corresponde a la corriente 7, la cual contiene el agua que proviene de la corriente principal (línea 5), ésta ingresa a un tratamiento de agua para caldera, el cual es un sistema de zeolitas que eliminan contenido de sales (carbonatos, bicarbonatos y silicatos) para evitar incrustaciones en el equipo. Esta agua tratada es alimentada a la caldera cada vez que el controlador de nivel de la caldera lo indique, y una vez que el nivel del equipo se encuentra bajo, se acciona la bomba P-1 para suministrar agua a la caldera; una vez llena, la bomba se detiene. Cada vez que se activa P-1, se aprecia la presión a la que trabaja el equipo a través del indicador de presión. El agua tratada continúa y atraviesa por dos trampas de sólidos (TV-1 y TV-2) antes de ingresar a la caldera (corriente 8) para comenzar la generación de vapor.

La segunda entrada es el combustible con el que se produce el calentamiento y generación de vapor del agua de la corriente 8. Este combustible es Gas LP que proviene de un tanque de almacenamiento situado en el edificio C de la Facultad de Química por lo cual está fuera del límite de batería del proceso. Esta línea de alimentación es la corriente 9, y contiene una trampa termodinámica (TV-3), medidores de presión y un sistema de control conectado al monitor electrónico de la caldera.

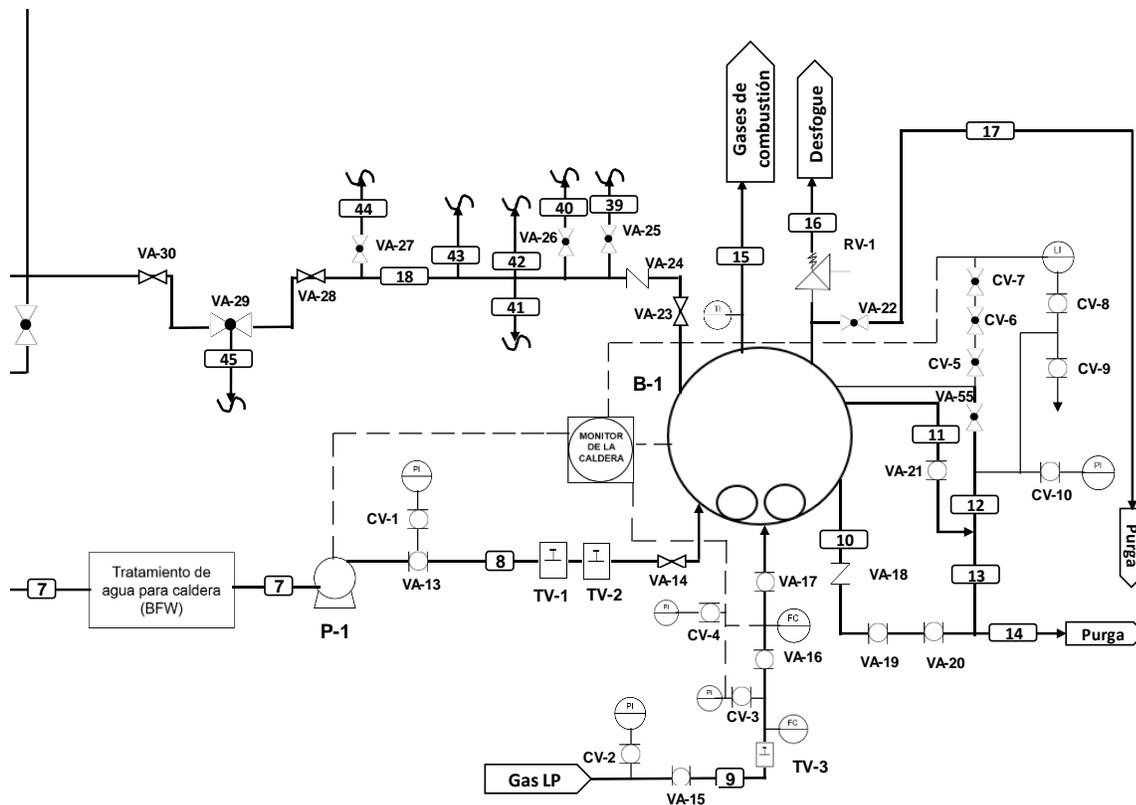


Figura 20. Sección del DTI-Caldera

La principal salida de la caldera es el vapor que se necesita para el proceso (corriente 18), esta línea se subdivide a su vez en varias corrientes secundarias debido a que el vapor generado no sólo se ocupa para el proceso de destilación sino para otros equipos de docencia del laboratorio. Estas líneas secundarias son la 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45 y la 46, las cuales se encuentran fuera del límite de batería del proceso como se señala en la figura 20.

La caldera tiene varias salidas adicionales, la primera es la corriente 10, siendo ésta una purga ya que sólo se abre cada cierto tiempo a través de las válvulas VA-19 y VA-20, con la finalidad de purgar la caldera de trazas de condensado que no se llega a evaporar. La corriente 11 es una línea de flujo auxiliar para el sistema de control, ésta se divide en la corriente 12 y 13, la primera se dirige a los sistemas de control de presión del equipo y la segunda es condensado que no ha llegado a la fase vapor; esta última se mezcla con la corriente 11 para obtener la corriente 14, que es una segunda purga que desemboca en el drenaje del Laboratorio de Ingeniería Química. La corriente 15 es la

salida de los gases de combustión del gas LP, ésta contiene un medidor de temperatura y se emite a la atmósfera. La corriente 16 es una línea de desfogue debido a que sólo funciona cuando la caldera rebasa la presión de seguridad que es  $6 \text{ kg/cm}^2$ ; si se rebasa esa presión, la válvula de seguridad RV-1 se abre en automático para liberar el exceso de vapor. La corriente 17 sólo funciona si se activa la RV-1, para eliminar cualquier condensado al momento de liberar el vapor; por tanto, la VA-22 se mantiene abierta, y esta línea es una purga que sale al drenaje del Laboratorio de Ingeniería Química.

El primer equipo principal en el proceso de destilación es el evaporador de calandria (EV-1), éste consta de 3 entradas y 3 salidas incluyendo una recirculación como se muestra en la figura 21. Este equipo funciona con la configuración siguiente: por los tubos se encuentra el fluido principal que es el agua de alimentación y por coraza se encuentra el servicio de calentamiento que es el vapor. Este equipo posee un indicador de nivel de vidrio, el cual proporciona el nivel de agua que existe en la configuración de los tubos. También cuenta con un medidor de presión, éste tiene una válvula de alivio RV-2 que se activa cuando la presión en el equipo está excedida. Por último, cuenta con dos indicadores de temperatura, uno en la parte inferior y el segundo en la parte superior del equipo para monitorear la temperatura del proceso. La primera entrada es la corriente 18, como se mencionó anteriormente es la línea de vapor que proviene del servicio auxiliar; esta línea tiene un medidor de presión para saber a cuánta presión está ingresando el vapor al EV-1, y en ella cuenta con una serie de válvulas que se mantienen abiertas en el proceso. La segunda entrada es la corriente 20, la cual es la línea de agua que funciona como materia prima principal, pues es la que al final del proceso se obtiene como agua destilada; esta línea proviene de la entrada principal de agua (corriente 5), y es intermitente debido a que sólo se alimenta al inicio del proceso de destilación a través de la válvula VA-40. Esta válvula se abre y por medio del indicador de nivel de vidrio se cierra cuando el nivel de agua de los tubos de la caldera se encuentra casi en el límite superior; durante el proceso se vigila el nivel de los tubos por si es necesario volver a abrir la válvula, o se mantiene con el agua de la recirculación de la cual se hablará más adelante.



corriente 18 ya no es agua fría sino agua caliente, lo cual que beneficia al funcionamiento del equipo. La corriente 19 se divide en dos líneas fuera del límite de batería (corriente 48 y 49) que se mantienen cerradas por parte de las válvulas que se observan en la figura 21.

El segundo equipo involucrado en el proceso de destilación es el condensador (CC-1), que se muestra en la figura 22, su función es condensar el vapor proveniente de la corriente de salida del evaporador de calandria (corriente 22). Para obtener el producto de interés que es el agua destilada, la configuración del condensador es la siguiente: por coraza se encuentra el fluido principal que es el vapor, y por tubos se encuentra el servicio de enfriamiento (agua). Además, el equipo sólo cuenta con un medidor indicador de temperatura, pero la ubicación inaccesible de éste dificulta el monitoreo de la temperatura.

El condensador consta de dos entradas, la primera es la entrada del fluido principal, el vapor de agua obtenido del EV-1; esta línea sube hasta el condensador (corriente 22) atravesando un Venturi, cuya función es capturar trazas de condensado de vapor, debido a que el vapor de esta línea está a presión atmosférica y por tanto existe la posibilidad de formación de condensado antes de la entrada al CC-1. De esta forma, este condensado es arrastrado por la corriente 24, la cual es agua proveniente de la división de la corriente 23 y que como se observa surge de la entrada principal (corriente 5). La corriente 24 está equipada con dos válvulas manuales que siempre están abiertas durante el proceso: VA-47 y VA-48. La corriente 25 contiene el condensado arrastrado y el agua fría de la corriente 24, y sólo es monitoreada a través de un medidor de temperatura, para luego ser desechada al drenaje del Laboratorio de Ingeniería Química. Por lo tanto, la corriente 26 que ingresa al CC-1 es vapor puro sin ninguna traza de condensado, es decir, con una calidad de 100%.

La segunda entrada es la corriente 27; ésta contiene al fluido de servicio o medio de enfriamiento que en este caso es agua fría proveniente de la división de la corriente 23, y que a su vez proviene de la entrada principal de agua (corriente 5). La corriente 23 está monitoreada por un indicador de temperatura y una válvula que está abierta durante el

proceso: VA-26. La línea 27 contiene sólo la válvula que se mantiene abierta durante el proceso de generación de agua.

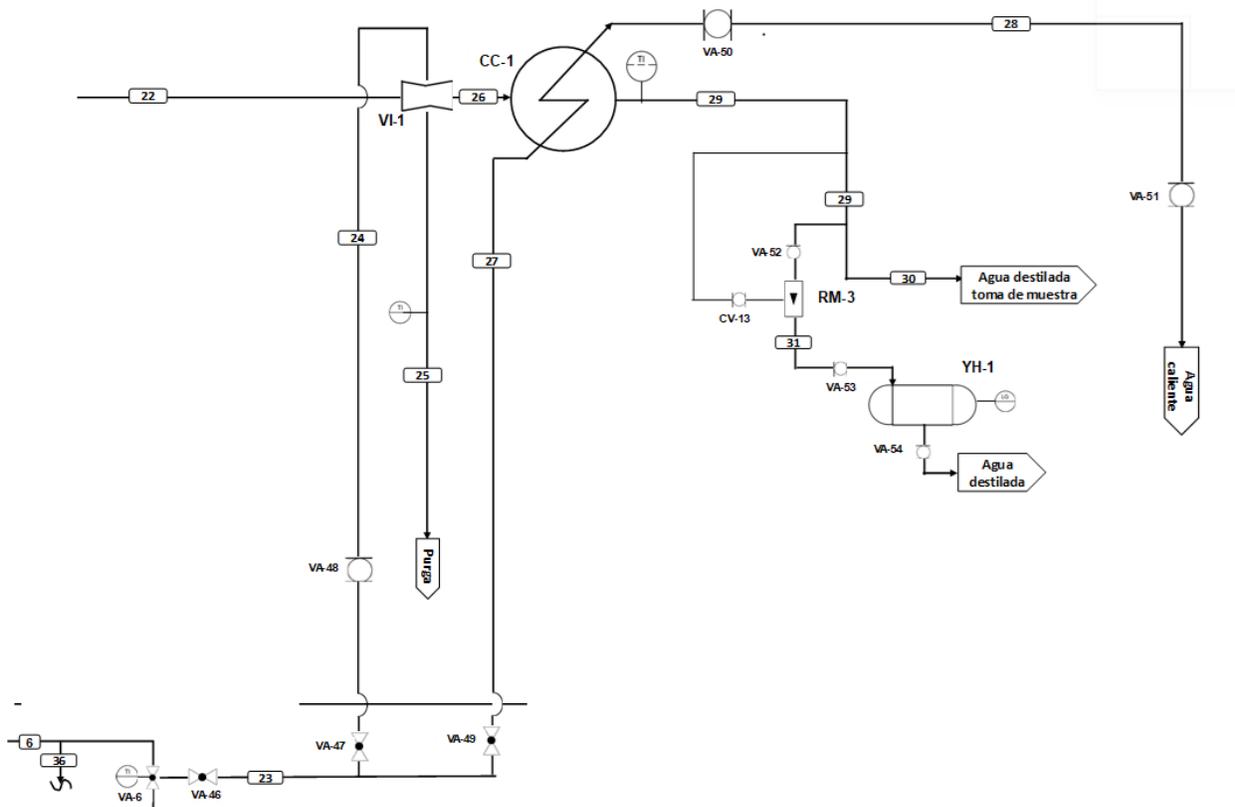


Figura 22. Sección del DTI-Condensador

La corriente 28 es la salida del servicio de enfriamiento, el cual es agua caliente. Esta línea es controlada por la VA-50 que se mantiene en todo momento abierta, y por la VA-51 que se mantiene abierta durante el proceso y se cierra al final de éste; esta agua es desechada directamente al drenaje del Laboratorio de Ingeniería Química. La corriente 29 es la segunda salida del CC-1, éste es el fluido principal que es el condensado o el agua destilada (corriente 29). Esta línea atraviesa por un rotámetro para conocer el flujo volumétrico que se está generando de agua destilada (RM-3). Asimismo, esta línea cuenta con una válvula VA-52, si es necesario tomar muestra del agua recién destilada se cierra y se obtiene la muestra correspondiente de la corriente 30; pero si no se

recolecta la muestra, la VA-52 se mantiene abierta para que la corriente 31 ingrese al tanque de almacenamiento YH-1. Este equipo de almacenamiento cuenta con un indicador de nivel de vidrio, el cual se vigila cada semana para que cuando el nivel se encuentre bajo se solicite el proceso de destilación; para la distribución del agua destilada el académico o alumno sólo necesita abrir la VA-54 para obtener el producto final.

#### **7.1.4. Balance de materia y energía.**

El planteamiento y desarrollo del balance de materia se puede consultar en el anexo 2 de este documento. El balance de materia se realizó por cada equipo para obtener todas las corrientes involucradas en el proceso, y como se mencionó en el DFP y en el DTI, las corrientes que se encuentran fuera del límite de batería se omitieron para el balance. Asimismo, como se observa en la figura 18 y la tabla 8, se omitió el balance de las corrientes del servicio auxiliar que es la caldera (corrientes 9 y 15). Como se muestra en la tabla 8, el análisis de las corrientes se realizó en flujo molar y másico por hora, y la cantidad de materia prima o producto según corresponda, se obtuvo en metros cúbicos para un mejor análisis del proceso suponiendo un promedio de duración de 5.5 horas de éste. Todos los resultados obtenidos por parte del balance de materia y energía se reportaron en unidades del Sistema Internacional (Secretaría de Economía, 2023).

Para la obtención de los flujos reportados en la tabla 8, el planteamiento se realizó a partir del condensador (CC-1), ya que el flujo de la corriente 29 se conoció por el rotámetro instalado (RM-3). Por tanto, a través del balance de energía se determinaron las corrientes faltantes involucradas en este equipo. Como se muestra, el agua de alimentación (corriente 27) ingresa a una temperatura de 19 °C y se necesitan 13.05 m<sup>3</sup> de agua de enfriamiento para generar solamente 0.89 m<sup>3</sup> de producto principal (corriente 31) que es el agua destilada; ésta se obtiene a una temperatura de 90 °C, por lo que durante el proceso no se recomienda el abastecimiento de agua por seguridad del personal.

*Tabla 8. Balance de materia del proceso de elaboración del agua destilada.*

Balance de materia global															
Corrientes	5	6	7	8	18 <sub>E1</sub>	19 <sub>E1</sub>	20	26 <sub>E1</sub>	18 <sub>E2</sub>	19 <sub>E2</sub>	26 <sub>E2</sub>	27	28	29	31
Flujo molar (kgmol/h)	343.88	343.88	212.42	212.42	23.58	23.58	69.65	8.68	8.68	8.68	8.68	131.46	131.46	8.68	8.68
Agua (kg/h)	6195.04	6195.04	3826.73	3826.73	0.00	424.76	1254.70	0.00	0.00	156.36	0.00	2368.31	2368.31	156.36	156.36
Vapor de agua (kg/h)	0.00	0.00	0.00	0.00	424.76	0.00	0.00	156.36	156.36	0.00	156.36	0.00	0.00	0.00	0.00
Temperatura (K)	292.15	292.15	290.15	290.15	420.33	365.15	292.15	366.03	420.33	365.15	366.03	292.15	328.15	363.15	363.15
Presión (kPa)	234.42	234.42	176.52	588.40	441.30	274.59	234.42	78.13	441.30	274.59	78.13	275.79	78.13	78.13	78.13
Flujo másico (kg/h)	6195.04	6195.04	3826.73	3826.73	424.76	424.76	1254.70	156.36	156.36	156.36	156.36	2368.31	2368.31	156.36	156.36
Flujo másico (kg/s)	1.72	1.72	1.06	1.06	0.12	0.12	0.35	0.04	0.04	0.04	0.04	0.66	0.66	0.04	0.04
Cantidad de materia o producto (m <sup>3</sup> )	34.14	34.14	21.08	21.08	31.47	0.08	0.22	57.65	364.05	0.89	1811.96	13.05	13.23	0.89	0.89

El balance del evaporador de calandria se resolvió en 2 etapas, la primera etapa en la cual la corriente 20 está activa, y la etapa 2 cuando el evaporador sólo funciona con la recirculación (corriente 19); ambas etapas se realizaron a partir del flujo de vapor a condensar (corriente 26) previamente determinado. Para la primera etapa, el planteamiento se realizó a partir de un balance de materia a régimen dinámico; la corriente 20 se determinó a partir de las condiciones experimentales del proceso que fue el tiempo de llenado del equipo, las características dimensionales del EV-1 y las dimensiones de la tubería de la línea de alimentación (corriente 20). A partir del balance de energía se determinaron las corrientes 18 y 19 como se muestra en el anexo 2. Como se indica en la tabla 8, para la etapa 1 se necesitan  $31 \text{ m}^3$  de servicio de calentamiento (corriente  $18_{E1}$ ) para generar  $57 \text{ m}^3$  de vapor a condensar (corriente  $26_{E1}$ ). Para el arranque del equipo se necesitan  $0.2 \text{ m}^3$  de fluido principal (corriente 20) para el llenado de los tubos de la calandria, el cual ingresa a una temperatura  $19 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Para la etapa 2 se planteó un balance de materia a régimen permanente, con una economía del equipo de 1, en donde la corriente 20 no se encuentra activa, como se observa en término de flujo másico del vapor de calentamiento disminuye debido a que el agua que está evaporando está a una temperatura de  $92 \text{ }^\circ\text{C}$ . Durante el proceso se necesitan  $364 \text{ m}^3$  de fluido de calentamiento (corriente 18), que ingresa a una temperatura de  $147 \text{ }^\circ\text{C}$  para generar  $1811 \text{ m}^3$  de vapor a condensar, los cuales a su vez ingresan al CC-1 a una temperatura de  $92.88 \text{ }^\circ\text{C}$ . Además, se recircula  $0.89 \text{ m}^3$  de vapor condensado (corriente 19) a una temperatura de  $92 \text{ }^\circ\text{C}$ , lo cual ayuda a la eficiencia del equipo.

El balance para la B-1, como se menciona en el anexo 2, se consideró una caja negra para su resolución. Por tanto, a partir de lo obtenido en los dos equipos se determinaron las corrientes faltantes (corrientes 7 y 8), debido que la corriente 5 se obtuvo experimentalmente a partir de la lectura del rotámetro RM-1.

En la tabla 9 se registra el balance de energía de los dos equipos involucrados en el proceso, para la obtención de las cargas térmicas se realizó simultáneamente el balance de materia como se muestra en el anexo 2. La carga obtenida para el CC-1 fue de  $358.81 \text{ MJ/h}$ , por lo que en el periodo de generación del agua destilada se invierten  $1973.44 \text{ MW}$

de energía; el equipo trabaja a una presión de 586 mmHg (presión barométrica media en Ciudad Universitaria) y a una temperatura máxima de 92.88 °C.

*Tabla 9. Balance de energía para el proceso de generación de agua destilada.*

<b>Balance de energía por equipo</b>			
<b>Equipo</b>	<b>Carga (MJ/h)</b>	<b>Carga (kJ/s)</b>	<b>Carga total durante el proceso (MW)</b>
<b>EV-1 (Etapa 1)</b>	899.72	249.92	157.45
<b>EV-1 (Etapa 2)</b>	331.20	92.00	1821.60
<b>CC-1</b>	358.81	99.67	1973.44

Como se muestra para el caso del evaporador de calandria, la carga térmica se determinó para las dos etapas consideradas en el proceso; para la etapa 1 se determinó una carga térmica de 899.72 MJ/h, y en 10.5 minutos se invierte una carga térmica de 157.45 MW de energía. Para el caso de la etapa 2 la carga térmica generada fue de 331.20 MJ/h en el periodo total de generación de agua destilada, y se invierten 1821.60 MW; se nota una reducción de la carga térmica debido a la recirculación, pues se reduce el gradiente de temperaturas entre el vapor y el condensado, ahora el vapor está evaporando el fluido principal a 92 °C y no a 19 °C como sucede con el agua fría.

Como se observó en la tabla 8, la cantidad total generada correspondiente de cada corriente en metros cúbicos en el periodo promedio de 5.5 horas que dura el proceso. En este tiempo se generan 0.89 m<sup>3</sup> de agua destilada u 890 L, para obtener esta cantidad de agua se emplean 364 m<sup>3</sup> de fluido auxiliar (vapor de calentamiento) y 13.05 m<sup>3</sup> de servicio de agua de enfriamiento para el CC-1. Por tanto, para el caso de la etapa de evaporación el proceso demanda gran cantidad de vapor de calentamiento a pesar de que el equipo funciona con la recirculación del condensado del vapor; esto se puede deber a que el aislante del equipo presenta deficiencias, pues no mantiene el sistema sólo con la temperatura del vapor, por lo que el vapor tiende a condensarse en la coraza antes de generar intercambio de calor en el agua de los tubos, y por eso está demandando esta cantidad de calor. A pesar de las pérdidas de calor, la recirculación ahorra 268 kg/h de vapor, por lo que se recomienda mejorar el aislante del equipo para que este ahorro se incremente.

Para el caso del condensador, se observa que se necesitan 13,050 L de agua de enfriamiento para generar sólo 890 L de agua destilada a lo largo del proceso, por lo que indica deficiencias en el proceso.

Se calculó la pérdida de energía por parte de la coraza al exterior porque está habiendo transferencia de calor del vapor hacia el ambiente lo cual influye a que se necesite un poco menos de agua de enfriamiento que si el equipo estuviera aislado por completo. De acuerdo con los resultados que se obtuvieron no se recomienda aislar el equipo ya que las pérdidas de calor hacia el ambiente representan menos del 1%.

#### **7.1.5. Hoja de datos de los equipos.**

Las hojas de datos de los equipos se realizaron de acuerdo con las plantillas encontradas en la literatura (Couper, 2010), mostradas en el anexo 3; se realizó una copia exacta de la plantilla sugerida del autor, pero se realizaron omisiones debido a que algunos datos no se pudieron obtener por parte del equipo debido a la imposibilidad de recabar datos por parte del proveedor, esto debido a la antigüedad de los equipos involucrados en el proceso. Las unidades reportadas están en Sistema Internacional, exceptuando algunos datos que por convergencia con los equipos se decidió reportar en Sistema Inglés. La función de estas hojas fue recolectar los datos de importancia de cada uno de los equipos involucrados y permitir que estén al alcance de cualquier académico que desee conocer acerca del proceso de generación del agua destilada.

En la figura 23 se esquematiza la hoja de datos para la bomba P-1, ésta corresponde a la única bomba involucrada en el proceso. De acuerdo con la plantilla original, se omitieron las secciones de diseño, materiales y ejecución debido a que estos datos son propios del diseño interno y externo del equipo, lo cual carece de interés para el análisis de este equipo, debido a que sólo se requiere analizar su funcionamiento operacional.

En la primera sección de la hoja se registran los datos del propietario del equipo y de su ubicación física. Asimismo, el servicio para el que se está requiriendo, el tipo de bomba

y datos específicos del equipo obtenidos por parte de la etiqueta del proveedor (SENTINEL, 2023); cabe resaltar que en esta sección sólo se omitió el número de trabajo.

La segunda sección de la hoja son las condiciones de operación del equipo, donde se reportan las características del fluido que está bombeando el equipo, el flujo de operación, y las presiones de succión y descarga del equipo. A partir de estos datos, se obtuvo el NPSH ó CPNS en español, que es la columna positiva neta de succión a partir de lo descrito en la literatura (Valiente Barderas A., 2002), en esta sección se omitió el flujo de diseño y el NPSH regular debido a que son datos del diseño de la bomba que no se obtuvieron por parte del proveedor. La tercera sección hace referencia a las características del motor que acciona la bomba, estos se obtuvieron a partir de la etiqueta del proveedor.

HOJA DE DATOS DE BOMBA CENTRÍFUGA						
PARA	FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM		NO. DE TRABAJO	NA		
PLANTA	LABORATORIO DE INGENIERÍA QUÍMICA		NO. DE LA BOMBA	P-1		
LOCALIZACIÓN	CIRCUITO EXTERIOR S/N, COYOACÁN, CD. UNIVERSITARIA		NO. UNIDADES	1		
SERVICIO	AGUA DESTILADA		ACCIONAMIENTO DEL MOTOR	CA		
PROVEEDOR-CALIBRE Y MODELO	SENTINEL-NA-T6		NO. DE SERIE	780		
TIPO	TURBINA					
CONDICIONES DE OPERACIÓN						
FLUIDO	AGUA SUAVE	FLUJO (M <sup>3</sup> /S)	0.001	NPSH DE PROVECHO	1.364	FT FLUIDO
TEMPERATURA DE LA BOMBA (K)	290.150	FLUJO DE DISEÑO	NA	NPSH REGULAR	NA	FT AGUA
GRAVEDAD ESPECÍFICA (KG/M <sup>3</sup> )	998.651	PRESIÓN DE DESCARGA (PA)	588399.000	NPSH REGULAR	NA	FT FLUIDO
PRESIÓN DE VAPOR (PA)	1913.141	PRESIÓN DE SUCCIÓN (PA)	176519.700			
VISCOSIDAD (KG/S M)	0.001	ΔP (PA)	411879.300			
MANEJO						
MOTOR	3.00	HP	85	RPM		
VOLTS FASE CICLO	220-440 V, 3 FASES, 50-60 Hz					
NOTAS						
MOTOR DE TIPO TRIFÁSICO						

Figura 23. Hoja de datos de la bomba P-1.

En la figura 24 se representa la hoja de datos para el evaporador de calandria EV-1, la plantilla ocupada fue la de un intercambiador convencional de coraza y tubos. La sección que se omitió fue la de construcción, pues corresponde a datos del diseño del equipo los cuales no fueron obtenidos por parte del proveedor, además el análisis de este equipo es para la parte operacional y no del diseño del equipo. En la primera sección de la hoja se encuentran los datos de localización del equipo, características de tamaño, servicio y conexión, y los datos del propietario; en esta sección se omitieron los datos de superficie bruta por unidad y superficie por coraza debido a falta de datos del diseño del equipo. En la segunda sección de la hoja, se muestran las características operacionales del equipo, en este caso seccionadas para el lado de coraza y lado tubos del equipo. Aquí

se reportan datos fisicoquímicos de los fluidos, así como las condiciones de presión, se reporta la carga térmica y LMTD del proceso; en este caso se decidió reportar el flujo total a la entrada en flujo másico y volumétrico, los calores específicos en Sistema Inglés y la presión reportada en Sistema Internacional y unidades de  $\text{kg/cm}^2$  debido a que los medidores de presión en el Laboratorio de Ingeniería Química están diseñados en estas unidades de presión. En esta sección última se omitieron el número de pasos, la velocidad, caída de presión y resistencia a la incrustación debido a que son datos del diseño del equipo.

HOJA DE ESPECIFICACIÓN DE UN INTERCAMBIADOR					
CLIENTE	FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM		NO. TRABAJO	NA	
DIRECCIÓN	CIRCUITO EXTERIOR S/N, COYOACÁN, CD. UNIVERSITARIA		NO. REFERENCIA	NA	
LOCALIZACIÓN DE LA PLANTA	LABORATORIO DE INGENIERÍA QUÍMICA		NO. CONSULTA	NA	
UNIDAD DE SERVICIO	EVAPORADOR DE LA DESTILADORA DE AGUA		FECHA	27/06/2023	
TAMAÑO (M <sup>2</sup> )	0.6126	TIPO	CORAZA Y TUBOS (CALANDRIA)	NO. ARTÍCULO	EV-1
SUPERFICIE BRUTA POR UNIDAD	-	CARCASAS POR UNIDAD	1	CONECTADA EN	LÍNEA 18
			SUPERFICIE POR CORAZA	ND	
RENDIMIENTO DE UNA UNIDAD					
		LADO CORAZA		LADO TUBOS	
FLUIDO A CIRCULAR		VAPOR DE CALENTAMIENTO		AGUA CALIENTE	
FLUIDO TOTAL A LA ENTRADA (KG/S M <sup>3</sup> /S)	0.043	0.018	0.043	4.506E-05	
VAPOR (KG/S)	-	-	-	-	
LÍQUIDO (KG/S)	-	-	0.043	-	
VAPOR (SERVICIO)	-	0.043	-	-	
NO CONDENSABLES	-	-	-	-	
FLUIDO VAPORIZADO O CONDENSADO (KG/S)	-	0.043	-	-	
CONDENSADO DE VAPOR	-	-	-	-	
DENSIDAD DEL LÍQUIDO (KG/M <sup>3</sup> )	-	-	963.890	-	
DENSIDAD DEL VAPOR (KG/M <sup>3</sup> )	2.362	-	-	-	
VISCOSIDAD DEL LÍQUIDO (KG/S M)	-	-	3.172E-04	-	
VISCOSIDAD DEL VAPOR (KG/S M)	1.378E-05	-	-	-	
PESO MOLECULAR DEL VAPOR (KG/KGMOL)	18.015	-	-	-	
CALOR ESPECÍFICO-LÍQUIDOS (BTU/LB °F)	-	-	1.005	-	
CALOR ESPECÍFICO-VAPORES (BTU/LB °F)	0.547	-	-	-	
TEMPERATURA DE ENTRADA (K)	420.332	-	365.150	-	
TEMPERATURA DE SALIDA (K)	365.150	-	366.025	-	
PRESIÓN DE OPERACIÓN ( PA- KG/CM <sup>2</sup> )	441299.250	4.500	274586.200	2.800	
NÚMERO DE PASOS POR CORAZA	-	-	-	-	
VELOCIDAD	-	-	-	-	
CAÍDA DE PRESIÓN	-	-	-	-	
RESISTENCIA A LA INCRUSTACIÓN	-	-	-	-	
CALOR INTERCAMBIADO (J/S)	91999.817	LMTD	55.182		
NOTAS					

Figura 24. Hoja de datos del evaporador de calandria EV-1.

En la figura 25 se muestra la hoja de datos del condensador CC-1, la plantilla es igual que para el EV-1, la plantilla clásica de un intercambiador de calor y de igual forma se omitió la sección de construcción debido a la falta de datos de diseño. En la primera sección de la hoja se encuentra los datos del propietario y la localización del equipo, su conexión, servicio y dimensiones. Se omitió la sección de la superficie bruta por unidad y superficie de coraza debido a que son datos propios del diseño. En la segunda sección de la hoja se muestran las condiciones operacionales del equipo, tanto para el lado de

coraza como de los tubos del equipo; se reportan datos fisicoquímicos del fluido principal y del servicio de enfriamiento, así como datos de presión y temperatura, carga térmica y LMTD del equipo. En esta sección se omitieron la velocidad, caída de presión y resistencia a la incrustación, ya que son datos del diseño del equipo. En la sección de notas se pudo sugerir la clasificación TEMA del equipo obtenida basada en la literatura (Valiente Barderas A., 2013).

HOJA DE ESPECIFICACIÓN DE UN INTERCAMBIADOR					
CLIENTE	FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM		NO. TRABAJO	NA	
DIRECCIÓN	CIRCUITO EXTERIOR S/N, COYOACÁN, CD. UNIVERSITARIA		NO. REFERENCIA	NA	
LOCALIZACIÓN DE LA PLANTA	LABORATORIO DE INGENIERÍA QUÍMICA		NO. CONSULTA	NA	
UNIDAD DE SERVICIO	CONDENSADOR DE LA DESTILADORA DEL AGUA		FECHA	27/06/2023	
TAMAÑO (M <sup>2</sup> )	0.293	TIPO	CORAZA Y TUBOS	NO. ARTÍCULO	CC-1
SUPERFICIE BRUTA POR UNIDAD	-	CARCASAS POR UNIDAD	1	CONECTADA EN	LÍNEA 26
			SUPERFICIE POR CORAZA	ND	
RENDIMIENTO DE UNA UNIDAD					
		LADO CORAZA	LADO TUBOS		
FLUIDO A CIRCULAR		VAPOR DE AGUA		AGUA DE ENFRIAMIENTO	
FLUIDO TOTAL A LA ENTRADA (KG/S M <sup>3</sup> /S)	0.043		0.092	0.658	0.001
VAPOR (KG/S)		0.043			-
LÍQUIDO (KG/S)		-			0.658
VAPOR (SERVICIO)		-			-
NO CONDENSABLES		-			-
FLUIDO VAPORIZADO O CONDENSADO (KG/S)		0.043			
CONDENSADO DE VAPOR		-			
DENSIDAD DEL LÍQUIDO (KG/M <sup>3</sup> )		-			998.089
DENSIDAD DEL VAPOR (KG/M <sup>3</sup> )		0.475			-
VISCOSIDAD DEL LÍQUIDO (KG/S M)		-			0.001
VISCOSIDAD DEL VAPOR (KG/S M)		1.174E-05			-
PESO MOLECULAR DEL VAPOR (KG/KGMOL)		18.015			-
CALOR ESPECÍFICO-LÍQUIDOS (BTU/LB °F)		-			0.998
CALOR ESPECÍFICO-VAPORES (BTU/LB °F)		1.005			-
TEMPERATURA DE ENTRADA (K)		366.025			292.150
TEMPERATURA DE SALIDA (K)		363.150			328.150
PRESIÓN DE OPERACIÓN ( PA- KG/CM <sup>2</sup> )	78126.692		0.797	78126.692	0.797
NÚMERO DE PASOS POR CORAZA		1			2
VELOCIDAD		-			-
CAÍDA DE PRESIÓN		-			-
RESISTENCIA A LA INCRUSTACIÓN		-			-
CALOR INTERCAMBIADO (J/S)	99668.93	LMTD			52.04
NOTAS					
CLASIFICACIÓN TEMA					
CLAVE. NEN					
CLASE. B O C					

Figura 25. Hoja de datos del condensador CC-1.

En la figura 26 se presenta la hoja de datos de la válvula de alivio o seguridad RV-1; esta válvula está conectada en la caldera B-1, y en cuanto a su funcionamiento, si el equipo llega a la temperatura máxima del sistema, se abre automáticamente para liberar el exceso de vapor. Al igual que la plantilla para intercambiadores de calor, para este caso se omitió la sección de construcción de la válvula debido a que son datos de diseño del equipo, los cuales no se recolectaron debido a que el análisis de estos equipos es sólo

operacional. En la primera sección de la hoja se observan los datos de identificación del equipo, servicio, presión y temperatura a condiciones de operación normales; se omitió en esta sección la marca de la válvula debido a que no se obtuvo la información requerida, y el porcentaje de acumulación debido a que éste es dato de diseño. En la segunda sección de la hoja, se muestran las características del fluido que se desfoga y la presión máxima; los datos de contrapresión y área de orificio se omitieron debido a que son datos de diseño. Las presiones reportadas están en Sistema Inglés debido a que los medidores instalados en esta sección cuentan con este sistema de unidades.

HOJA DE ESPECIFICACIÓN DE VÁLVULA DE ALIVIO O SEGURIDAD	
FECHA DE REVISIÓN	NA
NO. DE ARTÍCULO	RV-1
NO. DE ETIQUETA	ND
SERVICIO DE LA VÁLVULA	DESFOGUE
NO. TIPO Y MANUFACTURA	ND
NÚMERO DE VÁLVULAS REQUERIDAS	1.00
PRESIÓN NORMAL DEL SISTEMA (PSI)	60.00
TEMPERATURA NORMAL DEL SISTEMA (K)	513.15
CONDICIÓN ALTERADA QUE GOBIERNA	MÁXIMA PRESIÓN
PORCIENTO DE ACUMULACIÓN	-
CONDICIONES DEL TAMAÑO DE LA VÁLVULA	
FLUIDO QUE FLUYE	VAPOR
CANTIDAD DE FLUJO (KG/S)	0.04
DENSIDAD DEL VAPOR (KG/M <sup>3</sup> )	0.47
TEMPERATURA DEL FLUIDO (K)	513.15
VISCOSIDAD DEL FLUIDO (KG/S M)	1.38E-05
PRESIÓN DE AJUSTE (PSI)	85.34
PRESIÓN DE ENTRADA (PSI)	60.00
CONTRAPRESIÓN (PSI)	-

*Figura 26. Hoja de datos de válvula de alivio o seguridad RV-1.*

En la figura 27 se exhibe la hoja de datos de la válvula de alivio o seguridad RV-2; esta válvula se localiza en el EV-1 controla la presión de vapor dentro del equipo. De la plantilla original se omitió la sección de construcción, debido a que es parte del diseño del equipo y no es necesario para el análisis del equipo. En la primera sección de la hoja se encuentran los datos del propietario, la localización de la válvula, su servicio, marca y modelo obtenidas del proveedor (Vayremex, 2023), también las condiciones de temperatura y presión de operación. En esta parte se omitió el porcentaje de acumulación debido a que no se obtuvo el dato por parte del proveedor. En la segunda sección de la hoja se muestran las características del fluido de desfogue, así como datos de presión de entrada y presión máxima, estos se encuentran en unidades de kg/cm<sup>2</sup> debido a que

el medidor de presión en el equipo cuenta con estas unidades. El área de orificio se obtuvo por parte del proveedor y lo único que no se obtuvo fue la contrapresión de ésta.

<b>HOJA DE ESPECIFICACIÓN DE VÁLVULA DE ALIVIO O SEGURIDAD</b>	
<b>FECHA DE REVISIÓN</b>	NA
<b>NO. DE ARTÍCULO</b>	RV-2
<b>NO. DE ETIQUETA</b>	ND
<b>SERVICIO DE LA VÁLVULA</b>	DESFOGUE
<b>NO. TIPO Y MANUFACTURA</b>	MODELO 210-VAYREMEX
<b>NÚMERO DE VÁLVULAS REQUERIDAS</b>	1
<b>PRESIÓN NORMAL DEL SISTEMA (KG/CM<sup>2</sup>)</b>	2.80
<b>TEMPERATURA NORMAL DEL SISTEMA (K)</b>	365.15
<b>CONDICIÓN ALTERADA QUE GOBIERNA</b>	MÁXIMA PRESIÓN
<b>PORCIENTO DE ACUMULACIÓN</b>	-
<b>CONDICIONES DEL TAMAÑO DE LA VÁLVULA</b>	
<b>FLUIDO QUE FLUYE</b>	VAPOR
<b>CANTIDAD DE FLUJO (KG/S)</b>	0.04
<b>DENSIDAD DEL VAPOR (KG/M<sup>3</sup>)</b>	0.47
<b>TEMPERATURA DEL FLUIDO (K)</b>	365.15
<b>VISCOSIDAD DEL FLUIDO (KG/S M)</b>	1.17E-05
<b>PRESIÓN DE AJUSTE (KG/CM<sup>2</sup>)</b>	7.00
<b>PRESIÓN DE ENTRADA (KG/CM<sup>2</sup>)</b>	2.80
<b>CONTRAPRESIÓN (PSI)</b>	-
<b>ÁREA DE ORIFICO O DESCARGA (M<sup>2</sup>)</b>	7.80E-05

*Figura 27. Hoja de datos de válvula de alivio o seguridad RV-2.*

## 7.2. Caracterización del agua de alimentación y del agua destilada.

Con base en lo descrito anteriormente, se presenta a continuación el procedimiento llevado a cabo para la caracterización de agua destilada en el diagrama de la figura 28. El primer punto de muestreo se ubicó en la salida del intercambiador de calor, este punto se eligió para poder efectuar el análisis completo del proceso de producción. El segundo punto de muestreo se localizó a la salida del tanque de almacenamiento y distribución del agua destilada; éste se consideró para determinar si existe contaminación por parte del tanque. El último punto de muestreo se encuentra en el agua proveniente de cualquiera de las llaves del Laboratorio de Ingeniería Química; ésta se examinó para determinar la remoción de contaminantes en el proceso de destilación. El análisis de cada una de las diferentes muestras se llevó a cabo por triplicado, de los cuales se llevó a cabo un promedio de cada parámetro mostrado en la tabla 10. El procedimiento de manejo de muestra está esquematizado en la Figura 28, el cual es aplicable para las diferentes muestras antes mencionadas:

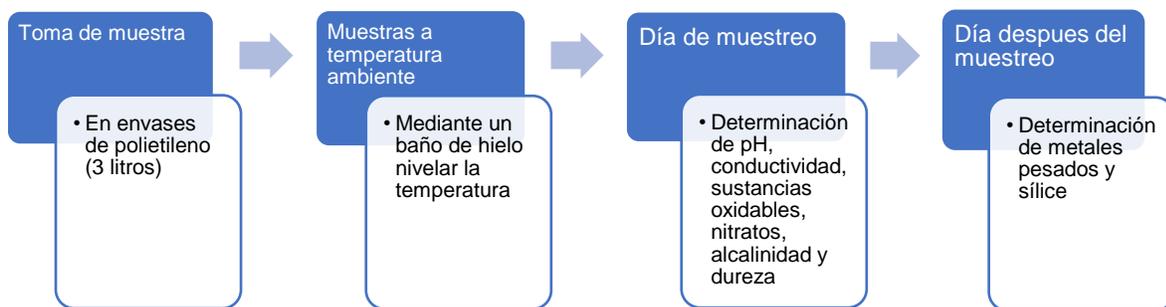


Figura 28. Diagrama de manejo de muestras para caracterización

Tabla 10. Caracterización del agua en las diferentes etapas del proceso de producción del agua destilada.

		Agua de alimentación		Agua recién destilada		Agua destilada almacenada en tanque	
Parámetro	Unidad de medición	Resultado	Criterio*	Resultado	Criterio	Resultado	Criterio
pH	-	7.29	6.5-8.5	6.28	5.0-7.0	6.96	5.0-7.0
Conductividad	μS/cm	146.35	NA	6.08	< 2.1	9.19	< 2.1
Sustancias oxidables	-	Fijación de coloración rosa	NA	Fijación de coloración rosa	Fijación de coloración rosa	Fijación de coloración rosa	Fijación de coloración rosa
Metales pesados	-	No hubo coloración verde pardo	NA	No hubo coloración verde pardo	Intensidad de color verde pardo menor a la referencia	No hubo coloración verde pardo	Intensidad de color verde pardo menor a la referencia
Nitratos	ppm	6.20	<11.00	0.03	< 0.20	0.06	< 0.20
Dureza total	mg/L de CaCO <sub>3</sub>	144.21	<500.00	4.17	< 17.00	3.94	< 17.00
Dureza de calcio	mg/L de CaCO <sub>3</sub>	23.84	<500.00	1.22	< 17.00	1.99	< 17.00
Sílice	mg/L SiO <sub>2</sub>	52.74	NA	2.90	< 0.003	21.55	< 0.003
Alcalinidad	mg/L de CaCO <sub>3</sub>	144.23	NA	27.36	< 75.00	28.53	< 75.00

**NA: No aplica**

**\*NOM-127-SSA1-2021** (Secretaría de Gobernación, 2023)

La determinación de pH fue cuantitativa, el procedimiento experimental consistió en sumergir el electrodo y esperar su estabilización, el equipo proporcionaba en automático el valor de pH. Como se observa en la tabla 10, el pH registrado del agua de alimentación fue de 7.29, este valor se encuentra en un rango neutro de acuerdo a la NOM-127-SSA1-2021. Se determinó que este parámetro se reduce 1.01 unidades después del proceso de destilación, por lo tanto, se validó que el proceso de destilación es eficiente para cumplir con el parámetro de pH que establece la FEUM (ver tabla 2). Existe contaminación por almacenamiento en el tanque de distribución del agua destilada debido a que incrementa el valor 0.4 unidades; de acuerdo con esto tiende a ser más neutro, lo cual valida la existencia de contaminación por parte de sales (bicarbonatos y silicatos) que tienden a un pH básico, pero este incremento no interfiere con el cumplimiento de la FEUM.

La evaluación de la conductividad fue cuantitativa, por lo que el procedimiento experimental consistió en sumergir la celda en la muestra y esperar su estabilización, el equipo proporcionaba el valor de la conductividad automáticamente. Como se presenta en la tabla 10, el agua de alimentación contiene un nivel muy alto de conductividad, lo que indica que ingresa con una elevada cantidad de sales asociadas con dureza, sílice y alcalinidad. El proceso de destilación es eficiente ya que disminuye la conductividad en 140 unidades, pero no es suficiente debido a que no cumple con el valor máximo que indica la FEUM de 2.1  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . El dato obtenido de conductividad después del proceso de destilación muestra que este parámetro está fuera de especificación; una de las impurezas que puede provocar la elevada conductividad es la presencia de algún metal debido a que la tubería es de acero al carbón. Probablemente esta contaminación podría ser debido al hierro por la corrosión que existe en las tuberías y equipos involucrados en el proceso (condensador).

Otra de las posibles causas de la alta conductividad es ocasionada por trazas de magnesio, lo que provoca un aumento en la conductividad (Chang, 2017). Por tanto, como se evidencia en la tabla 10, existe dureza total asociada a este ion por lo que se corrobora lo antes mencionado.

Se confirmó la contaminación del agua destilada por el almacenamiento debido a que se incrementa un 30%. En este caso se ratifica que la contaminación es asociada al hierro, pues la contaminación por magnesio no se ve reflejada en el almacenamiento (dureza total).

Para la determinación de sustancias oxidables mediante un método colorimétrico, se reportó en la tabla 10 que existe una ligera pérdida de color en algunas de las muestras, pero promediando se observó que el agua de alimentación no contiene una alta concentración de materia orgánica. Por tanto, se confirma que efectivamente el proceso de destilación es eficiente para obtener agua destilada libre de materia orgánica, y el tanque de almacenamiento no genera contaminación biológica.

Para la evaluación de metales pesados, se recuerda que es una técnica cualitativa que incluye a los siguientes metales: plomo, mercurio, plata, bismuto, arsénico, antimonio, estaño, cobre y molibdeno. Como se expone en la tabla 10, el agua de alimentación no presenta una alta concentración de estos metales, por tanto, el proceso de destilación es eficiente confirmando la ausencia de estos metales, y además no existe contaminación por parte de estos metales en el almacenamiento. Esta prueba no excluye la existencia de contaminación por otros metales conductores que provoquen alta conductividad, como lo es el hierro, entonces se sugiere añadir una técnica cualitativa para la determinación de este metal (Burriel Martí, Fernando , 1951).

En la tabla 10, se muestra que el agua de alimentación ingresa con 6.2 mg/L de nitratos, por lo que está dentro del límite establecido por la NOM-127-SSA1-2021. El proceso de destilación es eficiente pues disminuye a casi cero la concentración de nitratos, cumpliendo así con lo establecido por la FEUM (ver tabla 2). Existe un incremento de concentración de 0.03 mg/L, lo cual indica una ligera contaminación por el almacenamiento, pero ésta no afecta para cumplir con lo indicado en la literatura antes mencionada.

Para la determinación de dureza total, como se mencionó anteriormente es una técnica cuantitativa de valoración con EDTA. Como se exhibe en la tabla 10, el agua de alimentación ingresa con 144.21 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ , según la clasificación de la literatura es considerada agua dura (Crittenden, 2012). El proceso de destilación es eficiente ya

que el agua producida cumple con la normatividad que indica una dureza menor a 17 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ , siendo entonces clasificada como blanda. Con esta determinación se confirmó que la dureza encontrada en el agua destilada es atribuible en gran parte al ion magnesio; este ion como se mencionó anteriormente tiene propiedades conductoras, por lo que se reafirmó su contribución a la elevación de la conductividad en el agua destilada. Por último, en la tabla 10 se confirma la ausencia de contaminación por almacenamiento en el tanque de agua destilada, pues se mantiene dentro de los valores de agua blanda.

En la determinación de sílice, el agua de alimentación ingresa con una alta concentración de sílice (tabla 10). El proceso de destilación remueve 50 mg/L de  $\text{SiO}_2$ , pero no es suficiente para cumplir con lo indicado por la ASTM (ver tabla 1), por tanto, se sugiere que el agua de alimentación se someta a un pretratamiento que disminuya un 50 % de concentración de sílice, para que, al momento de ingresar al proceso, el agua contenga un promedio de 26 mg/L de  $\text{SiO}_2$ . De esta forma, el proceso podría disminuir a casi cero la concentración de sílice cumpliendo así con lo establecido en la literatura. La concentración de sílice en el tanque de almacenamiento de agua destilada se eleva aproximadamente 8 veces, lo que indica una contaminación por parte del tanque; esto se atribuye a que el tanque de almacenamiento debe tener un mantenimiento mínimo cada 3 meses para evitar incrustaciones de silicatos.

Por último, para la caracterización de alcalinidad, se realizó una técnica cuantitativa de valoración con ácido clorhídrico. Como se indica en la tabla 10, el agua de alimentación ingresa con alta concentración de carbonatos y bicarbonatos. El proceso de destilación es eficiente ya que disminuye 115 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ , cumpliendo con lo establecido por CONAGUA (ver tabla 3). Se determinó la existencia de un ligero aumento en la alcalinidad para el agua destilada proveniente del tanque de almacenamiento, pero debido a que sólo aumenta una unidad de concentración, sigue cumpliendo con el valor máximo que establece CONAGUA.

A través de la caracterización del agua destilada se observa que está fuera del valor máximo dado por la ASTM de sílice por lo que se sugiere un pretratamiento reductor de sales, como el equipo ocupado para el tratamiento de agua para caldera, en este caso un tanque de zeolitas que reduzca la concentración de este tipo de sales, ya que como

se observó el proceso es eficiente en la reducción de sílice pero no lo suficiente para cumplir con lo establecido en la literatura, además se sugiere un mayor y constante mantenimiento del tanque de almacenamiento ya que como se observó existe una gran contaminación de este parámetro debido al almacenamiento. También el agua destilada está fuera del valor máximo de la conductividad dado por la FEUM, esto indica una alta concentración de iones atribuidas a sales de magnesio debido a que el proceso debe eliminar totalmente la dureza atribuida a este ion, esto se logrará con la recomendación realizada para eliminar sílice. Además, se sugiere enviar una muestra a la Unidad de Servicio de Apoyo a la Investigación y la Industria (USAII) que forma parte de la Facultad para un análisis de hierro por absorción atómica dado por la NMX-AA-051-SCFI-2001, debido a que las instalaciones del proceso presentan contaminación por hierro debido al desgaste de equipos y de las tuberías de acero al carbón. Adicionalmente se sugiere implementar una técnica cualitativa para la detección de hierro indicada en la literatura (Burriel Marti, Fernando , 1951) como complemento a la caracterización de metales pesados.

### **7.3. Propuesta de presupuesto para la implementación de las técnicas analíticas.**

En la tabla 11, se reporta el costo de reactivos, equipo y material por parámetro realizado; la determinación de estos costos se puede consultar en el anexo 4 de este documento. Todos los montos son reportados en pesos mexicanos del año 2023. El costo por reactivos se realizó considerando que la caracterización se efectuará de forma mensual, obteniendo así un gasto anual de reactivos de 1261 pesos. Para el caso de inversión de equipo y material se consideró la depreciación del material y del equipo, por lo que la inversión está reflejada para realizarse cada 5 ó hasta 10 años.

*Tabla 11. Resumen de costos para la implementación de las técnicas analíticas para el análisis del agua destilada producida en el Laboratorio de Ingeniería Química*

Parámetro	Costo de reactivos por prueba mensual	Costo de reactivos anual	Costo anual de equipo	Costo anual por material
pH	\$ 5.85	\$ 71.02	\$ 50,603.19	\$ 2,395.89
Conductividad	\$ 0.00	\$ 0.04	\$ 13,435.14	\$ 2,084.59
Sustancias oxidables	\$ 0.73	\$ 11.30	\$ 2,903.86	\$ 2,929.21
Metales pesados	\$ 10.55	\$ 523.41	\$ 1,677.60	\$ 11,920.09
Nitratos	\$ 0.10	\$ 20.91	\$ -	\$ 57,377.91
Dureza total	\$ 4.75	\$ 146.11	\$ 233.45	\$ 12,694.97
Dureza de calcio	\$ 4.65	\$ 123.63	\$ -	\$ 13,084.14
Sílice	\$ 7.89	\$ 187.43	\$ -	\$ 58,788.69
Alcalinidad	\$ 1.47	\$ 177.07	\$ 3,036.60	\$ 9,925.30
<b>Gasto total</b>	\$ 35.99	\$ 1,260.92	\$ 71,889.84	\$ 171,200.80

La segunda columna registra el costo de reactivos por prueba como se menciona en el anexo 4, la prueba engloba el manejo por triplicado de una muestra y el gasto por si es necesario blanco o reactivos para calibración. Se reporta un gasto total mensual de \$36 y un gasto anual de reactivos de \$1261, por lo cual la implementación de las técnicas analíticas para la caracterización del agua destilada es viable pues no afecta al presupuesto de la Facultad de Química.

Como se señala la prueba más económica es la determinación de la conductividad, ya que para este parámetro sólo se requiere aproximadamente 1 mL del reactivo principal (cloruro de potasio) por lo que el costo es demasiado bajo. De igual forma en la tercera columna se exhibe que este parámetro sigue siendo el más económico, pues se consideró sólo el uso de un reactivo tanto para el procedimiento experimental como para la calibración de la celda de conductividad.

El parámetro con el mayor gasto por prueba se evidencia que es la determinación de metales pesados, esto debido a que en la prueba se ocupa uno de los reactivos más caros en el mercado químico: la tioacetamida, el cual cuenta con un precio comercial de \$3873 por 50 g de producto. Por lo tanto, a pesar de que se necesitan sólo 4 g por año de reactivo, el precio eleva este parámetro tanto por prueba como de manera anual.

En la cuarta columna se registra el costo de inversión de los equipos, el cual sólo engloba los equipos exclusivos para esta caracterización. Se omite el costo de los equipos de uso

común que se encuentran ya instalados en el laboratorio. Además, se consideró la compra de equipos para la caracterización de los 9 parámetros, es decir, si algún equipo se repetía, sólo se consideró el costo de compra una sola vez. Como se menciona en el anexo 4, los costos se determinaron considerando una depreciación del 10% por diez años de vida útil. Se indica que el parámetro en el que se invirtió más en equipos es la determinación del pH, esto debido al uso exclusivo del multiparamétrico, el cual tiene un costo de \$47,699.33 considerando su depreciación. El parámetro con menor costo de equipos es el caso de la dureza total debido a que sólo se consideró la compra de las tiras indicadoras de pH. Como se señala para el caso de la determinación de nitratos, dureza de calcio y sílice, no existe inversión de equipos debido a que el costo de los equipos repetidos se consideró en otros parámetros como se mencionó anteriormente.

El gasto de compra de material anual se registra en la última columna con un valor de \$171,200.80, monto que considera una depreciación del 20% con una vida útil de 5 años, es decir, que la inversión representada en la tabla no es una inversión anual sino una a cinco años de plazo, esto debido a que se considera el desgaste del vidrio y a los accidentes que se pueden suscitar por la fragilidad del material. Se exhibe que los parámetros con mayor inversión de material es la determinación de sílice y nitratos; el primero es un poco mayor debido a que se ocupa un mayor número de materiales para la caracterización, pero para ambos se eleva el gasto debido al costo atribuido a las celdas de cuarzo para espectrofotómetro; el paquete de dos celdas tiene un costo en el mercado de \$58,718.00, lo cual impacta el presupuesto de estos dos parámetros. Si se usa correctamente este material, se puede ampliar su vida útil hasta 10 años, por lo cual la inversión disminuiría significativamente para estos dos parámetros a aproximadamente \$70. Los parámetros de pH, conductividad y sustancias oxidables son los parámetros que menor inversión presenta debido a su cantidad y a las características de estos, ya que la mayoría de los materiales son de uso químico convencional, no de uso de químico analítico de mayor precisión.

## 8. Conclusiones.

A través del levantamiento en sitio, se elaboró el conjunto de documentos de la ingeniería básica para el proceso de producción de agua destilada en el Laboratorio de Ingeniería Química, por lo que se identificó lo siguiente:

- Se realizó la filosofía de operación que permitió identificar que el proceso consta de 2 etapas: evaporación y condensación, con una única materia prima que abastece a las dos etapas y a un servicio auxiliar requerido para el proceso de evaporación, obteniendo un solo producto principal que es el agua destilada.
- Se elaboró el Diagrama de Flujo de Proceso (DFP) que representó de forma general las operaciones unitarias del proceso, así como la materia prima (entradas del proceso), productos (salidas del proceso) y equipos involucrados en la generación del agua destilada, permitiendo fijar el límite de batería del proceso.
- Se realizó el Diagrama de Tubería e Instrumentación (DTI) que representó la introducción a la ingeniería de detalle, con el objeto de permitir en un futuro continuar con el análisis a detalle del proceso de generación del agua destilada, y como documento de ayuda para proponer mejoras que influyan en el proceso o en la medición de algunos parámetros para la resolución de un balance de materia más a detalle.
- Se estableció el balance de materia y energía que permitió analizar el proceso de manera cuantitativa, obteniendo la cantidad de materia prima empleada y cuanto producto principal se genera en el Laboratorio de Ingeniería Química.
- Se elaboraron las hojas de datos de los equipos involucrados en el proceso, lo cual permite que en la actualidad se tenga conocimiento de la operación de los equipos. Se espera que un futuro este esfuerzo sea replicado para cada equipo del Laboratorio de Ingeniería Química.
- Con base a los resultados de la ingeniería básica, se determinó que el proceso de destilación no es eficiente debido a que para un periodo de 5.5 horas de proceso sólo se generan 890 litros de agua destilada a partir de 13,050 litros de agua de enfriamiento y 364 m<sup>3</sup> de vapor de calentamiento.

Mediante la caracterización de parámetros fisicoquímicos para el agua destilada producida en el Laboratorio de Ingeniería Química se determinó lo siguiente:

- Se realizó la selección de técnicas analíticas y a partir de esta selección se desarrolló el manual para la evaluación de la calidad del agua destilada.
- A través de la implementación de las técnicas analíticas, se identificó que el proceso de destilación no genera un agua nivel 1.
- El agua destilada producida en el Laboratorio de Ingeniería Química cumple con lo establecido en la FEUM para los siguientes parámetros: pH, sustancias oxidables, nitratos, dureza, metales pesados y alcalinidad.
- El agua destilada producida en el Laboratorio de Ingeniería Química no cumple con lo establecido en la literatura para los parámetros de conductividad y sílice.
- Por medio del manual de técnicas analíticas, se reportó el presupuesto para la implementación del análisis de calidad del agua destilada producida en el Laboratorio de Ingeniería Química, y por tanto es viable la inversión de esta implementación.

## **9. Recomendaciones.**

Debido a las conclusiones antes mencionadas, se presentan las siguientes sugerencias de mejora para la realización de un proceso de destilación más eficiente y para la obtención de agua nivel 1 con las características establecidas en la literatura:

- El evaporador de calandria requiere un aislante para reducir las pérdidas del calor ya que afecta la evaporación del agua.
- Inversión de aislantes para las tuberías y para el condensador (CC-1), todo ello con el objetivo de proteger al personal, pues esto puede ocasionar quemaduras en su piel.
- Reutilización del agua de enfriamiento (línea 28), ya que actualmente se desechan 13,230 litros de agua caliente al drenaje de la Facultad de Química. Por lo tanto, se sugiere redireccionar el agua a una cisterna para que el agua se pueda ocupar para otro servicio dentro o fuera del Laboratorio de Ingeniería Química, como

puede ser para riego o servicios sanitarios de la Facultad, o se sugiere invertir en un sistema de recirculación para enviar el agua caliente al servicio auxiliar (caldera) u otro equipo dentro del Laboratorio de Ingeniería Química que requiera agua caliente para su funcionamiento. Además, en lugar de la construcción de una cisterna, se invierte en la instalación de una torre de enfriamiento para la recirculación directamente al condensador (línea 27).

- Se sugiere la inversión de un medidor de flujo y una salida para toma de muestra en la recirculación del evaporador de calandria (línea 19), con el fin de obtener datos más exactos del funcionamiento del equipo, y para el análisis fisicoquímico del agua condensada del vapor de calentamiento.
- Se sugiere la inversión de un pretratamiento de deionización, ósmosis inversa, ultrafiltración, columna de intercambio iónico u adsorción orgánica antes de ingresar al proceso de destilación, ya que el proceso por sí solo no genera un agua con las características de un agua nivel 1.
- Se recomienda un mantenimiento trimestral al tanque de almacenamiento y distribución, pues se determinó que existe contaminación por almacenamiento de este equipo. Se sugiere contemplar la inversión de un tanque de polietileno de alta densidad en lugar de uno de acero con el que se cuenta actualmente.

## 10. Referencias.

- Annual Book of ASTM Standards*. (2003). West Conshohocken Pennsylvania: ASTM INTERNATIONAL.
- Bassel, W. D. (1974). *Preliminary Chemical Engineering Plant Design*. Ohio: ELSEVIER.
- Burriel Marti, Fernando . (1951). Descriptiva de los cationes. In F. B. Marti, *Química analítica cualitativa* (pp. 222-228). Madrid: Paraninfo.
- Chacón Chaquea, Myriam Yaneth . (2017). *Análisis físico y químico de la calidad del agua*. Colombia: Ediciones USTA.
- Chang, R. (2017). *Química*. México: McGraw Hill.
- Comisión Nacional de Agua. (2022, Abril 15). *Gobierno de México*. Retrieved from <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/normas-mexicanas-83266>
- CONAGUA. (2023, Enero 29). *Ley Federal de Derechos*. Retrieved from Disposiciones aplicables en materias de aguas nacionales 2022: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/723707/Ley\\_Federal\\_de\\_Derechos\\_2022.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/723707/Ley_Federal_de_Derechos_2022.pdf)
- Couper, J. R. (2010). *Chemical Process Equipment Selection and Design*. USA: Butterworth-Heinemann.
- Crittenden, J. C. (2012). *MWH's Water Treatment Principles and Design* . New Jersey: Wiley.
- Dickey, D. S. (1991). Practical formulas calculate: Water properties. *Chemical Engineering*, 235-236.
- Graham, J. (1993). Algunos datos útiles sobre el agua y el hielo. In J. Graham, *El hielo en las pesquerías* (p. 93). Reino Unido: FAO.
- Himmelblau, D. M. (1997). *Principios Básicos y Cálculos en Ingeniería Química* . México: Prentice-Hall Hispanoamerica S.A.
- Jayawardana, J. (2016). *Water Resource and the Aquatic Environment*. New York: Novinka.
- Kern, D. Q. (1999). *Procesos de transferencia de calor* . México: Compañía Editorial Continental CECSA.
- López Villagrán, Mario Augusto. (2023, 06 2023). *Departamento de tesis*. Retrieved from <http://132.248.9.195/ptd2017/febrero/0755607/Index.html>
- Ludwig, E. E. (2007). Process Planning, Scheduling and Flowsheet Design. In E. E. Ludwig, *Applied process design for chemical and petrochemical plants. Vol. 1* (pp. 19-22). GPP.

- Secretaría de Economía. (2023, 06 29). *Diario Oficial de la Federación*. Retrieved from NOM-008-SCFI-2002:  
[https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=718870&fecha=27/11/2002#gsc.tab=0](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=718870&fecha=27/11/2002#gsc.tab=0)
- Secretaría de Economía. (2023, 06 30). *NMX-AA-008-SCFI-2016*. Retrieved from  
<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166767/NMX-AA-008-SCFI-2016.pdf>
- Secretaría de Economía. (2023, Enero 29). *NMX-AA-079-SCFI-2001*. Retrieved from  
<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166794/NMX-AA-079-SCFI-2001.pdf>
- Secretaría de Gobernación. (2023, 08 2023). *Diario Oficial de la Federación*. Retrieved from NORMA Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua.:  
[https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5650705&fecha=02/05/2022#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5650705&fecha=02/05/2022#gsc.tab=0)
- Secretaría de Gobernación. (2023, 10 02). *Diario Oficial de la Federación*. Retrieved from NOM-092-SSA1-1994:  
[https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=4886029&fecha=12/12/1995#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4886029&fecha=12/12/1995#gsc.tab=0)
- Secretaría de Gobernación. (2023, 06 30). *Parámetros de Estimación de Vida Útil*. Retrieved from  
[https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5264340&fecha=15/08/2012#gsc.tab=0](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5264340&fecha=15/08/2012#gsc.tab=0)
- Secretaría de Hacienda y Crédito Público. (2023, 06 30). *Proyectos México oportunidades de inversión*. Retrieved from  
[https://www.proyectosmexico.gob.mx/por-que-invertir-en-mexico/economia-solida/politica-monetaria/sd\\_tasas-de-inflacion-historicas/](https://www.proyectosmexico.gob.mx/por-que-invertir-en-mexico/economia-solida/politica-monetaria/sd_tasas-de-inflacion-historicas/)
- Secretaría de Salud. (2018). *FARMACOPEA de los Estados Unidos Mexicanos*. México: Litografía Gil, S.A de C.V.
- SENTINEL. (2023, 06 29). *BOMBA TIPO TURBINA SERIE T*. Retrieved from  
[https://www.imbo.com.mx/serie\\_t.html](https://www.imbo.com.mx/serie_t.html)
- Sinnott, R. K. (2005). *Chemical Engineering Design*. Oxford: ELSEVIER.
- Smith, J. (2001). *Introduction to chemical engineering thermodynamics*. New York: McGraw Hill.
- Timmerhaus, M. S. (1991). *Plant design and economics for chemical engineers*. Singapur: McGraw Hill International Editions.
- Valiente Barderas A. (2002). *Problemas de flujo de fluidos*. México: LIMUSA.

Valiente Barderas A. (2013). *Problemas de transferencia de calor*. México: Limusa.

Vayremex. (2023, 06 29). *Válvula de seguridad recta 210*. Retrieved from <https://www.vayremex.com/producto/valvula-de-seguridad-recta-210>

## **Anexos.**

### **Anexo 1. Glosario**

ASTM: Sociedad Americana para Pruebas y Materiales.

Agua nivel 1 según la FEUM: puede ser obtenida a partir de agua potable por un proceso de destilación (Secretaría de Salud, 2018).

Agua nivel 2 según la FEUM: se prepara a partir de agua potable con pretratamientos necesarios como desionización, ósmosis inversa y/o ultrafiltración, la destilación en la etapa final es recomendable (Secretaría de Salud, 2018).

Agua tipo I según ASTM: aquella que se obtiene por destilación, seguida de un tratamiento de intercambio iónico (Annual Book of ASTM Standards, 2003).

Agua tipo II según ASTM: aquella que se obtiene por destilación (Annual Book of ASTM Standards, 2003).

CONAGUA: Comisión Nacional del Agua.

COT: Carbono Orgánico Total, consiste en que la materia orgánica natural se oxida completamente a CO<sub>2</sub>, que se extrae de la muestra y se mide en la fase gaseosa. COT no es igual a la concentración de materia orgánica natural, pero es un sustituto que da una indicación de la concentración de materia orgánica natural siempre que la composición elemental no cambie (Crittenden, 2012).

DFP: Diagrama de Flujo de Proceso.

DTI: Diagrama de Tubería e Instrumentación.

EDTA: Sal disódica del ácido etilendiaminotetraacético dihidratado.

FEUM: Farmacopea de los Estados Unidos Mexicanos.

MGA: Método General de Análisis.

Multiparamétrico: medidor compacto ideal para pruebas de calidad de agua en los laboratorios, con capacidad para detectar pH, mV, conductividad, TDS, ion selectivo, oxígeno disuelto y temperatura.

μS/cm: Unidades de medición de conductividad, microsiemens por centímetro.

NMX: Normas Mexicanas.

ppm: partes por millón.

UFC: Unidades Formadoras de Colonias, término que debe utilizarse para reportar la cuenta de colonias en placa, las cuales pueden surgir de una célula o de un cúmulo de células (Secretaría de Gobernación, 2023).

## Anexo 2. Memoria de cálculo para balance de materia y energía

### Condensador (CC-1)

El planteamiento del balance de materia y energía comenzó desde el condensador CC-1, que engloba a las corrientes 26, 27, 28, 29, 30 y 31, aunque la corriente 30 no se determinó en el balance debido a que es una corriente intermitente y por tanto no forma parte del régimen permanente del proceso.

El flujo de la corriente 29 se conoció gracias al RM-3, leyendo un flujo volumétrico de 2.7 L/min. La temperatura del flujo se determinó con un termómetro obteniendo una lectura de 90 °C y la presión se determinó como la atmosférica de 586 mmHg. A partir de estos datos se prosiguió a calcular la densidad del agua como se observa en la ecuación 1, donde la T es la temperatura del fluido en °F, dado que la relación original se obtiene en (lb/ft<sup>3</sup>), se realizó la conversión para la obtención en Sistema Internacional.

#### *Ecuación 1 (Dickey, 1991)*

$$\text{Densidad del agua} \left( \frac{kg}{m^3} \right) = \left( 62.7538 - ((3.5347 * 10^{-3}) * T) - ((4.8193 * 10^{-5}) * T^2) \right) * \left( \frac{1}{2.20462} \right) * \left( \frac{1}{0.3048^3} \right)$$

A partir de la densidad se calculó el flujo másico de la corriente 29 como se muestra en la ecuación 2, donde el flujo volumétrico se convirtió previamente en unidades de m<sup>3</sup>/s, para sólo realizar la conversión de segundos a horas:

#### *Ecuación 2*

$$\text{Flujo másico} \left( \frac{kg}{h} \right) = \text{Densidad del agua} \left( \frac{kg}{m^3} \right) * \text{Flujo volumétrico} \left( \frac{m^3}{s} \right) * 3600$$

A partir del flujo másico se obtuvo el flujo molar de la corriente 29 como se exhibe en la ecuación 3, donde el peso molecular del agua se obtuvo a partir de los pesos moleculares del hidrógeno y oxígeno reportados en la literatura (Crittenden, 2012) en kg/kgmol:

#### *Ecuación 3*

$$\text{Flujo molar} \left( \frac{kgmol}{h} \right) = \frac{\text{Flujo másico} \left( \frac{kg}{h} \right)}{\text{Peso molecular del agua} \left( \frac{kg}{kgmol} \right)}$$

Por tanto, se determinó que la corriente 29 es igual a la 31 y sólo en términos de flujo másico ésta es igual a la corriente 26, como se presenta a continuación:

*Ecuación 4*

$$\text{Corriente 29} = \text{Corriente 31}$$

*Ecuación 5*

$$\text{Flujo másico de corriente 29} = \text{Flujo másico de corriente 26}$$

A partir de lo señalado en la ecuación 5, se prosiguió a determinar las propiedades faltantes de la corriente 26, sabiendo que es ahora agua, pero en fase vapor a presión ambiente de 586 mmHg. Se determinó la temperatura del vapor a través de la ecuación de Antoine (ecuación 6), donde la presión está dada en mmHg, la temperatura se obtiene en K y las constantes son las siguientes A:18.30, B:3816.44, C: -46.13 (Himmelblau, 1997) :

*Ecuación 6*

$$T(K) = \frac{-B}{\ln P^\circ - A} - C$$

A partir de la temperatura obtenida en la ecuación 6 se determinó la densidad del vapor de agua, donde la T está en °F, la relación inicial se obtiene en lb/ft<sup>3</sup>, por tanto, se realizó la conversión para obtenerla en Sistema Internacional

*Ecuación 7 (Dickey, 1991)*

$$\text{Densidad del vapor de agua} \left( \frac{kg}{m^3} \right) = \left[ \exp \left( -9.3239 + \left( (4.1055 * 10^{-2}) * T \right) - \left( (7.1159 * 10^{-5}) * T^2 \right) + \left( (5.7039 * 10^{-8}) * T^3 \right) \right) \right] * \left( \frac{1}{2.20462} \right) * \left( \frac{1}{0.3048^3} \right)$$

A partir de la densidad del vapor de agua obtenida en la ecuación 7, se determinó el flujo volumétrico de la corriente 26:

*Ecuación 8*

$$\text{Flujo volumétrico} \left( \frac{m^3}{s} \right) = \frac{\text{Flujo másico} \left( \frac{kg}{s} \right)}{\text{Densidad del vapor de agua} \left( \frac{kg}{m^3} \right)}$$

A partir del flujo másico y el peso molecular del agua obtenidos de la ecuación 8, se determinó el flujo molar de la corriente 26:

*Ecuación 9*

$$\text{Flujo molar} \left( \frac{\text{kgmol}}{\text{h}} \right) = \frac{\text{Flujo másico} \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)}{\text{Peso molecular del agua} \left( \frac{\text{kg}}{\text{kgmol}} \right)}$$

A partir del conocimiento de las corrientes del flujo principal, se prosiguió al planteamiento del balance de energía del condensador para la obtención del fluido de enfriamiento. Se planteó el cálculo de la carga térmica del equipo a partir de la ecuación 10, donde sólo se consideró la carga térmica atribuida por el cambio de fase y el subenfriamiento. La carga térmica atribuida al desobrecalentamiento se omitió debido a que el vapor es saturado y no sobrecalentado. El flujo másico debe de estar en lb/ft<sup>3</sup>, el calor latente de vaporización en BTU/lb, el calor específico del agua en BTU/lb °F y la temperatura en °F, obteniendo la carga térmica en BTU/h, por tanto, se añadió la conversión para la obtención de la carga en J/h:

*Ecuación 10 (Kern, 1999)*

$$q \left( \frac{\text{J}}{\text{h}} \right) = \left[ (\text{Flujo másico}_{C26} * \lambda_{vap}) + (\text{Flujo másico}_{C26} * C_{p_{liq}} * (T_1 - T_2)) \right] * 1055.06$$

La temperatura media que se ocupó para la determinación del calor latente de vaporización y el calor específico se determinó de acuerdo con la ecuación 11

*Ecuación 11 (Kern, 1999)*

$$T_m(^{\circ}\text{F}) = \frac{T_{C26} + T_{C29}}{2}$$

El calor latente de vaporización para la ecuación 10 se determinó de la siguiente forma, donde T es la temperatura media calculada en la ecuación 11:

*Ecuación 12 (Dickey, 1991)*

$$\lambda_{vap} \left( \frac{BTU}{lb} \right) = 1087.54 - (0.43110 * T) - ((5.5440 * 10^{-4} * T^2))$$

El calor específico del agua ocupada en la ecuación 10, se determinó de acuerdo con la siguiente ecuación, donde la T es la temperatura media calculada en la ecuación 11:

*Ecuación 13 (Dickey, 1991)*

$$Cp_{liq} \left( \frac{BTU}{lb \text{ } ^\circ F} \right) = 1.0152 - ((3.6171 * 10^{-4}) * T) + ((2.1709 * 10^{-6} * T^2)) - ((2.9831 * 10^{-9}) * T^3)$$

A partir de la carga determinada para el condensador, se determinó la carga térmica asociada a las pérdidas de calor entre la coraza y el exterior ( $q_p$ ) debido a que el equipo no cuenta con ningún tipo de aislante, por tanto, esta se obtiene como se muestra en la ecuación 14, donde la carga asociada a la pérdida de energía está dada en BTU/h, el coeficiente combinado de convección y radiación en el ambiente exterior ( $h_a$ ) está en BTU/h ft<sup>2</sup> °F, el área de transferencia en ft<sup>2</sup> y las temperaturas en °F; la temperatura de la superficie corresponde a la temperatura del vapor a la que ingresa a la coraza y la temperatura del ambiente se estimó de 28 °C:

*Ecuación 14 (Kern, 1999)*

$$q_p \left( \frac{BTU}{h} \right) = (h_a * A_T * (T_{sup} - T_{amb}))$$

Para obtener el área de transferencia se obtuvo a través del levantamiento en sitio las medidas del CC-1, obteniendo una longitud de 75.6 pulgadas y un diámetro de 6 pulgadas, por tanto, el área de transferencia se obtuvo de la siguiente forma, observando que se incluye la conversión de in<sup>2</sup> a ft<sup>2</sup>:

*Ecuación 15 (Kern, 1999)*

$$A_T(ft^2) = \frac{\pi * D * L}{12^2}$$

El coeficiente combinado de convección y radiación en el ambiente exterior ( $h_a$ ) se obtuvo a partir de la siguiente ecuación, donde  $h_c$  es el coeficiente de convección y  $h_r$  el coeficiente de radiación:

*Ecuación 16 (Kern, 1999)*

$$h_a \left( \frac{BTU}{h \text{ ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F}} \right) = h_c + h_r$$

El coeficiente de convección o  $h_c$  se obtuvo a partir de la ecuación 17, donde el diámetro está en pulgadas y la temperatura en  $^\circ\text{F}$

*Ecuación 17 (Kern, 1999)*

$$h_c \left( \frac{BTU}{h \text{ ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F}} \right) = 0.5 * \left( \frac{T_{sup} - T_{amb}}{D} \right)^{0.25}$$

El coeficiente de radiación o  $h_r$  se obtuvo a partir de la ecuación 18, donde las temperaturas del nominador se reportan en  $^\circ\text{R}$  y las temperaturas del denominador se reportan en  $^\circ\text{F}$  y  $\epsilon$  es la emisividad de radiación térmica de la superficie, ésta se obtuvo de la literatura (Kern, 1999), eligiendo la superficie de hierro oxidado:

*Ecuación 18 (Kern, 1999)*

$$h_r \left( \frac{BTU}{h \text{ ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F}} \right) = \frac{0.173 * \epsilon * \left[ \left( \frac{T_{sup}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{amb}}{100} \right)^4 \right]}{T_{sup} - T_{amb}}$$

A partir de la carga determinada para el condensador y la carga térmica por pérdidas de energía se determinó el flujo de la corriente del servicio de enfriamiento:

*Ecuación 19 (Kern, 1999)*

$$q \left( \frac{BTU}{h} \right) = (\text{Flujo másico}_{C27} * C_{p_{ME}} * (t_2 - t_1)) + q_p$$

Despejando de la ecuación 19 el flujo másico de la corriente 27, se obtiene la ecuación 20 donde el flujo está en lb/h, pero se incluye la conversión para obtenerlo en Sistema Internacional, el calor específico está en BTU/lb  $^\circ\text{F}$  y las temperaturas en  $^\circ\text{F}$ :

*Ecuación 20*

$$\text{Flujo másico} \left( \frac{kg}{h} \right) = \left[ \frac{q - q_p}{Cp_{ME} * (t_2 - t_1)} \right] * \left( \frac{1}{2.2046} \right)$$

Para la determinación del calor específico del agua fría, se determinó la temperatura media de acuerdo con la ecuación 21:

*Ecuación 21 (Kern, 1999)*

$$T_m(^{\circ}F) = \frac{T_{C28} + T_{C27}}{2}$$

El calor específico del medio de enfriamiento que se ocupa en la ecuación 20 se determinó de la siguiente forma, donde T es la temperatura media calculada previamente:

*Ecuación 22 (Dickey, 1991)*

$$Cp_{liq} \left( \frac{BTU}{lb^{\circ}F} \right) = 1.0152 - ((3.6171 * 10^{-4}) * T) + ((2.1709 * 10^{-6} * T^2)) - ((2.9831 * 10^{-9}) * T^3)$$

Al determinar el flujo másico de la corriente 27 a partir de la ecuación 20, se calculó el flujo molar a partir del peso molecular del agua:

*Ecuación 23*

$$\text{Flujo molar} \left( \frac{kgmol}{h} \right) = \frac{\text{Flujo másico} \left( \frac{kg}{h} \right)}{\text{Peso molecular del agua} \left( \frac{kg}{kgmol} \right)}$$

A partir de la temperatura de la corriente 27 obtenida experimentalmente, se realizó el cálculo de la densidad del agua:

*Ecuación 24 (Dickey, 1991)*

$$\text{Densidad del agua} \left( \frac{kg}{m^3} \right) = \left( 62.7538 - ((3.5347 * 10^{-3}) * T) - ((4.8193 * 10^{-5}) * T^2) \right) * \left( \frac{1}{2.20462} \right) * \left( \frac{1}{0.3048^3} \right)$$

A partir de la densidad determinada en la ecuación 24 y el flujo másico de la corriente 27, se determinó el flujo volumétrico correspondiente:

*Ecuación 25*

$$\text{Flujo volumétrico} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) = \frac{\text{Flujo másico} \left( \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right)}{\text{Densidad del vapor de agua} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)}$$

Al determinar el flujo másico de la corriente 27, éste es igual al de la corriente 28 porque no hay acumulación en el condensador, como se muestra en la ecuación 26:

*Ecuación 26*

$$\text{Flujo másico de corriente 27} = \text{Flujo másico de corriente 28}$$

A partir del conocimiento del flujo másico de la corriente 28 se determinó el flujo molar a partir del peso molecular del agua:

*Ecuación 27*

$$\text{Flujo molar} \left( \frac{\text{kgmol}}{\text{h}} \right) = \frac{\text{Flujo másico} \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)}{\text{Peso molecular del agua} \left( \frac{\text{kg}}{\text{kgmol}} \right)}$$

A partir de la temperatura de la corriente 28 obtenida experimentalmente, se calculó la densidad del agua:

*Ecuación 28 (Dickey, 1991)*

$$\text{Densidad del agua} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = \left( 62.7538 - ((3.5347 * 10^{-3}) * T) - ((4.8193 * 10^{-5}) * T^2) \right) * \left( \frac{1}{2.20462} \right) * \left( \frac{1}{0.3048^3} \right)$$

A partir de la densidad de la ecuación 28, se determinó el flujo volumétrico de la corriente 28:

*Ecuación 29*

$$\text{Flujo volumétrico} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) = \frac{\text{Flujo másico} \left( \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right)}{\text{Densidad del vapor de agua} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)}$$

En la figura 29 se muestra en el perfil de temperaturas obtenido para el CC-1:

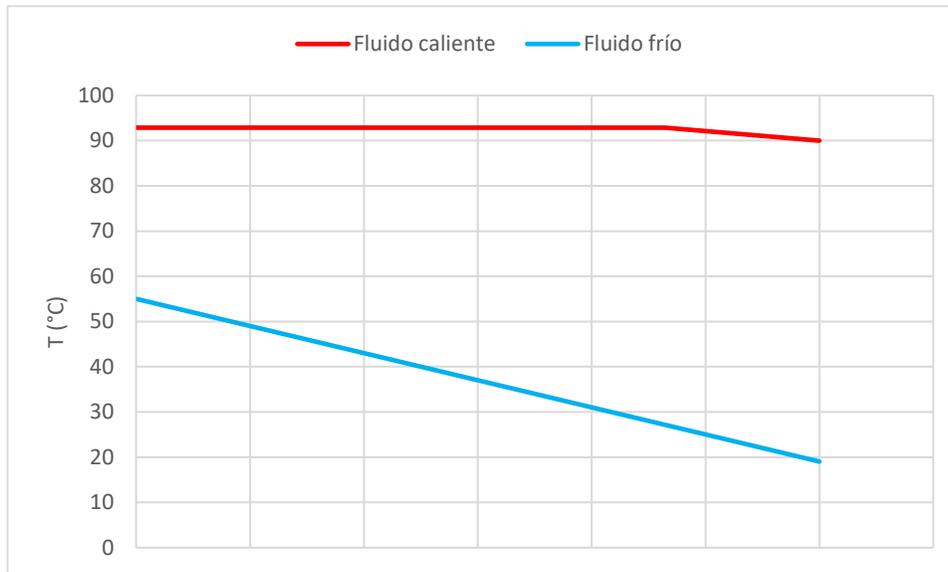


Figura 29. Perfil de temperaturas del CC-1

### Evaporador de calandria (EV-1)

A partir de lo obtenido para el condensador, se realizó el balance de materia y energía para el evaporador. El balance se realizó considerando las dos etapas del proceso, la primer etapa se resolvió como un balance a régimen dinámico, pues como se explicó en la filosofía de operación, la corriente 20 sólo se abre al inicio del proceso para abastecer al evaporador, y una vez lleno el equipo hasta un cierto nivel fijado en el indicador de vidrio, esta corriente deja de fluir. Esto quiere decir que el balance depende de la derivada del volumen de llenado con respecto al tiempo. Por otro lado, la segunda etapa se realizó a régimen permanente considerando que el proceso sólo está funcionando con la recirculación de la corriente 19.

#### Etapa 1. Régimen dinámico

Para la primera etapa se consideró el planteamiento del balance de materia del fluido principal incluyendo el término de acumulación, como se muestra en la ecuación 30. Esta acumulación está dada por la derivada de la masa del fluido al interior del equipo respecto al tiempo. Entonces, la corriente 20 alimentada es igual a la acumulación más la

producción del vapor, que en este caso es el flujo másico de la corriente 26 ya calculado anteriormente (ecuación 5):

*Ecuación 30*

$$\text{Flujo másico}_{C20} = \frac{d\rho V}{dt} + \text{Flujo másico}_{C26}$$

Se planteó a su vez el balance de energía del equipo a partir del fluido principal, como se observa en la ecuación 31 se consideró la carga aportada por la corriente 20, el cambio de fase y la variación del volumen de llenado con respecto al tiempo:

*Ecuación 31*

$$(\text{Flujo másico}_{C20} * Cp_{C20} * (T_{C20} - T^{\circ})) + q = (\text{Flujo másico}_{C26} * \lambda_{vap}) + \left( \frac{d\rho V}{dt} * Cp_{20} * (T_{eb} - T^{\circ}) \right)$$

Por tanto, se despeja la derivada de la ecuación 30, obteniendo la ecuación 32, en esta se está representando la acumulación del agua en el evaporador, es decir la cantidad de agua que no se está evaporando. Cabe mencionar que la densidad se consideró constante con respecto al tiempo de llenado:

*Ecuación 32*

$$\rho \frac{dV}{dt} = \text{Flujo másico}_{C20} - \text{Flujo másico}_{C26}$$

Sustituyendo la ecuación 32 en la ecuación 31 se obtiene la siguiente expresión:

*Ecuación 33*

$$(\text{Flujo másico}_{C20} * Cp_{C20} * (T_{C20} - T^{\circ})) + q = (\text{Flujo másico}_{C26} * \lambda_{vap}) + (Cp_{20} * (\text{Flujo másico}_{C20} - \text{Flujo másico}_{C26})(T_{eb} - T^{\circ}))$$

Desarrollando y simplificando la ecuación 28 se obtiene la carga térmica del evaporador a régimen dinámico:

*Ecuación 34*

$$q = (\text{Flujo másico}_{C26} * \lambda_{vap}) - (Cp_{20} * \text{Flujo másico}_{C26}(T_{eb} - T^{\circ})) + (\text{Flujo másico}_{C20} * Cp_{C20} * (T_{eb} - T_{20}))$$

A partir de la ecuación 34, para la simplificación del cálculo, se supone que la temperatura de referencia es cero, debido a que estamos suponiendo condiciones normales para esta parte de la ecuación, es decir, temperatura de 273.15 K o 0 °C; este método es aplicado por la literatura (Smith, 2001) para facilitar la simplificación algebraica de la ecuación y para evitar entalpías puntuales negativas, por tanto la ecuación 35 corresponde a la carga térmica para el régimen dinámico de la etapa 1. El primer término de la ecuación representa el cambio de fase que es la evaporación de la corriente 20, el segundo término representa la carga generada por el flujo principal, y el tercer término representa la acumulación que existe al momento del cambio de fase; por último, la carga es obtenida en BTU/h por tanto se incluye la conversión para obtenerla en Sistema Internacional:

*Ecuación 35*

$$q \left( \frac{J}{h} \right) = [(Flujo\ mássico_{C26} * \lambda_{vap}) + (Flujo\ mássico_{C20} * Cp_{C20} * (T_{eb} - T_{20})) - (Cp_{20} * Flujo\ mássico_{C26} * T_{eb})] * 1055.06$$

Para determinar la carga térmica de la ecuación 35, para el caso del primer término de la ecuación, se sabe el flujo másico de la corriente 26 determinado en la ecuación 5, y el calor latente de vaporización se determinó a partir de la temperatura de la corriente 26 que se determinó en la ecuación 6, donde la temperatura está en °F:

*Ecuación 36 (Dickey, 1991)*

$$\lambda_{vap} \left( \frac{BTU}{lb} \right) = 1087.54 - (0.43110 * T) - ((5.5440 * 10^{-4} * T^2))$$

Para determinar el segundo término de la ecuación 35, se prosiguió a la determinación del flujo másico de la corriente 20; éste se determinó a partir de los datos físicos del equipo, primero se determinó el volumen de llenado del equipo como se observa en la ecuación 37 a partir del nivel del equipo y el diámetro de este:

*Ecuación 37*

$$Volumen_{EV-1} (m^3) = \frac{\pi}{4} * Diámetro_{EV-1}^2 * Altura_{EV-1}$$

Gracias al levantamiento en sitio se determinó experimentalmente el tiempo de llenado del equipo EV-1, por tanto, con el tiempo de llenado (minutos) y el volumen (m<sup>3</sup>), se determinó el flujo volumétrico de la corriente 20 como se muestra en la ecuación 38:

*Ecuación 38*

$$\text{Flujo volumétrico} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \right) = \frac{\text{Volumen}_{EV-1}}{\text{Tiempo de llenado del EV} - 1}$$

Se determinó la densidad de la corriente 20 a partir de la temperatura obtenida experimentalmente. Esta densidad inicialmente se obtiene en lb/ft<sup>3</sup>, por tanto, se incluyen las conversiones de unidades correspondientes para obtenerla en unidades del SI:

*Ecuación 39 (Dickey, 1991)*

$$\text{Densidad del agua} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = \left( 62.7538 - ((3.5347 * 10^{-3}) * T) - ((4.8193 * 10^{-5}) * T^2) \right) * \left( \frac{1}{2.20462} \right) * \left( \frac{1}{0.3048^3} \right)$$

A partir del flujo volumétrico obtenido en la ecuación 38 y la densidad obtenida de la ecuación 39 se obtiene el flujo másico de la corriente 20:

*Ecuación 40*

$$\text{Flujo másico} \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) = \text{Flujo volumétrico} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \right) * \text{Densidad del agua} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) * 60$$

A partir del flujo másico de la corriente 20 obtenido en la ecuación anterior y con el peso molecular del agua dado anteriormente, se determinó el flujo molar de la corriente 20:

*Ecuación 41*

$$\text{Flujo molar} \left( \frac{\text{kgmol}}{\text{h}} \right) = \frac{\text{Flujo másico} \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)}{\text{Peso molecular del agua} \left( \frac{\text{kg}}{\text{kgmol}} \right)}$$

Para la determinación del calor específico de la corriente 20, se consideró la temperatura registrada en el equipo que es de 92 °C, y a esta temperatura se le sumó el aumento en el punto de ebullición (APE) debido a la presencia de sales en el agua, pues afectan el punto de ebullición del agua pura (Valiente Barderas A., 2013). Esta concentración se

determinó a partir de la conductividad registrada para el agua de alimentación (Tabla 6), mostrada en la siguiente ecuación:

*Ecuación 42 (Chacón Chaquea, Myriam Yaneth , 2017)*

$$\text{Concentración de NaCl (ppm)} = \frac{\text{Conductividad}_{C20}}{2}$$

A partir de la ecuación 42 y con el diagrama de Dühring (Valiente Barderas A., 2013), se obtuvo el incremento de temperatura APE, cuyo valor es de 2 °C:

*Ecuación 43*

$$T_{eb \text{ real}}(^{\circ}C) = T_{EV-1} + 2$$

Por último, se obtuvo el calor específico de la corriente 20 considerando la cantidad de sales. Esta propiedad se obtuvo para agua salada, ya que sus principales iones son cloruro y sodio. (Graham, 1993). Una vez obtenidos todos estos datos, se calculó la carga térmica del evaporador a un régimen dinámico. Por último, a través de la carga térmica se determinó el flujo del servicio de calentamiento, en este caso es el flujo másico de la corriente 18, como se señala en la ecuación 44:

*Ecuación 44*

$$\text{Flujo másico} \left( \frac{kg}{h} \right) = \left[ \frac{q \left( \frac{BTU}{h} \right)}{\lambda_{vap} \left( \frac{BTU}{lb} \right)} \right] * \left( \frac{1}{2.2046} \right)$$

Para determinar el calor latente de vaporización de la ecuación 44, éste se calculó a partir de la temperatura del vapor de la corriente 18. A partir de la presión de entrada y con la ecuación de Antoine (ecuación 45) se determinó la temperatura del vapor, donde la presión se convirtió en mmHg, la temperatura se obtiene en K y las constantes son las siguientes A:18.30, B:3816.44, C: -46.13 (Himmelblau, 1997) :

*Ecuación 45*

$$T(K) = \frac{-B}{\ln P^{\circ} - A} - C$$

A partir de la temperatura del vapor de la corriente 18 se obtiene el calor latente de vaporización (ecuación 46) para ser ocupado en la ecuación 44, donde la temperatura se convirtió en °F:

*Ecuación 46*

$$\lambda_{vap} \left( \frac{BTU}{lb} \right) = 1087.54 - (0.43110 * T) - ((5.5440 * 10^{-4} * T^2))$$

A partir del conocimiento del flujo másico de la corriente 18 (ecuación 44), se determinó el flujo molar a partir del peso molecular del agua:

*Ecuación 47*

$$\text{Flujo molar} \left( \frac{kgmol}{h} \right) = \frac{\text{Flujo másico} \left( \frac{kg}{h} \right)}{\text{Peso molecular del agua} \left( \frac{kg}{kgmol} \right)}$$

A partir de la temperatura de la corriente 18 obtenida en la ecuación 45, se calculó la densidad del vapor de agua:

*Ecuación 48. (Dickey, 1991)*

$$\text{Densidad del vapor de agua} \left( \frac{kg}{m^3} \right) = \left[ \exp(-9.3239 + ((4.1055 * 10^{-2}) * T) - ((7.1159 * 10^{-5}) * T^2) + ((5.7039 * 10^{-8}) * T^3)) \right] * \left( \frac{1}{2.20462} \right) * \left( \frac{1}{0.3048^3} \right)$$

A partir de la densidad de la ecuación 48, se determinó el flujo volumétrico de la corriente 18:

*Ecuación 49*

$$\text{Flujo volumétrico} \left( \frac{m^3}{s} \right) = \frac{\text{Flujo másico} \left( \frac{kg}{s} \right)}{\text{Densidad del vapor de agua} \left( \frac{kg}{m^3} \right)}$$

Por último, se consideró que el flujo másico la corriente 18 es igual a la corriente 19 como se muestra a continuación:

*Ecuación 50*

$$\text{Flujo másico de corriente 18} = \text{Flujo másico de corriente 19}$$

A partir del conocimiento del flujo másico de la corriente 19 se determinó el flujo molar a partir del peso molecular del agua

*Ecuación 51*

$$\text{Flujo molar} \left( \frac{\text{kgmol}}{\text{h}} \right) = \frac{\text{Flujo másico} \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)}{\text{Peso molecular del agua} \left( \frac{\text{kg}}{\text{kgmol}} \right)}$$

A partir de la temperatura de la corriente 19 determinada experimentalmente, se calculó la densidad del agua

*Ecuación 52 (Dickey, 1991)*

$$\text{Densidad del agua} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = \left( 62.7538 - ((3.5347 * 10^{-3}) * T) - ((4.8193 * 10^{-5}) * T^2) \right) * \left( \frac{1}{2.20462} \right) * \left( \frac{1}{0.3048^3} \right)$$

A partir de la densidad de la ecuación 52 se determinó el flujo volumétrico de la corriente 19:

*Ecuación 53*

$$\text{Flujo volumétrico} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) = \frac{\text{Flujo másico} \left( \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right)}{\text{Densidad del vapor de agua} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)}$$

Etapa 2

Para la segunda etapa de la operación, se realizó el planteamiento omitiendo la corriente 20 ya que en esta etapa del proceso la válvula VA-40 se encuentra cerrada. Como el equipo seguirá operando de esta forma el resto del tiempo, se realizó un planteamiento a régimen permanente considerando la recirculación de la corriente 19. Se supuso para este planteamiento que la economía del evaporador es igual a 1, esto significa que la relación de kg de agua evaporada y los kg de vapor suministrado son iguales (Valiente Barderas A., 2013). Con esta suposición, en términos de flujo másico la corriente 26 previamente calculada es igual a la corriente 18 y ésta a su vez es igual a la corriente 19 como se muestra en la ecuación 54:

*Ecuación 54*

*Flujo másico de corriente 26 = Flujo másico de corriente 18 = Flujo másico de corriente 19*

A partir de la ecuación 54 se determinó el flujo molar de la corriente 18 a partir del flujo másico y del peso molecular del agua:

*Ecuación 55*

$$\text{Flujo molar} \left( \frac{\text{kgmol}}{\text{h}} \right) = \frac{\text{Flujo másico} \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)}{\text{Peso molecular del agua} \left( \frac{\text{kg}}{\text{kgmol}} \right)}$$

A partir de la temperatura de la corriente 18 calculada en la ecuación 45, se obtuvo la densidad del vapor de agua:

*Ecuación 56 (Dickey, 1991)*

$$\text{Densidad del vapor de agua} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = \left[ \exp \left( -9.3239 + \left( 4.1055 \cdot 10^{-2} \right) \cdot T \right) - \left( 7.1159 \cdot 10^{-5} \right) \cdot T^2 + \left( 5.7039 \cdot 10^{-8} \right) \cdot T^3 \right] \cdot \left( \frac{1}{2.20462} \right) \cdot \left( \frac{1}{0.3048^3} \right)$$

A partir de la densidad de la ecuación 56 se determinó el flujo volumétrico de la corriente 18:

*Ecuación 57*

$$\text{Flujo volumétrico} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) = \frac{\text{Flujo másico}}{\text{Densidad del agua}}$$

A partir de la ecuación 54 se determinó el flujo molar de la corriente 19, y con éste flujo másico y el peso molecular del agua:

*Ecuación 58*

$$\text{Flujo molar} \left( \frac{\text{kgmol}}{\text{h}} \right) = \frac{\text{Flujo másico} \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)}{\text{Peso molecular del agua} \left( \frac{\text{kg}}{\text{kgmol}} \right)}$$

A partir de la temperatura de la corriente 19, determinada por los instrumentos del equipo, se calculó la densidad del agua:

*Ecuación 59 (Dickey, 1991)*

$$\text{Densidad del agua} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = \left( 62.7538 - ((3.5347 * 10^{-3}) * T) - ((4.8193 * 10^{-5}) * T^2) \right) * \left( \frac{1}{2.20462} \right) * \left( \frac{1}{0.3048^3} \right)$$

A partir de la densidad de la ecuación 59 se determinó el flujo volumétrico de la corriente 19:

*Ecuación 60*

$$\text{Flujo volumétrico} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) = \frac{\text{Flujo másico} \left( \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right)}{\text{Densidad del vapor de agua} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)}$$

Por último, el balance de energía está solamente dado por la carga térmica atribuida por el cambio de fase como se señala en la ecuación 61. Para el cálculo del calor latente de vaporización se ocuparon las ecuaciones 45 y 46 que ya se describieron anteriormente. De igual forma la carga se obtiene inicialmente en BTU/h, por tanto, se incluye la conversión a SI

*Ecuación 61 (Kern, 1999)*

$$q \left( \frac{\text{J}}{\text{h}} \right) = (\text{Flujo másico}_{C18} * \lambda_{vap}) * 1055.06$$

En la figura 30 se representa el perfil de temperaturas del EV-1 en la etapa 2 del proceso:

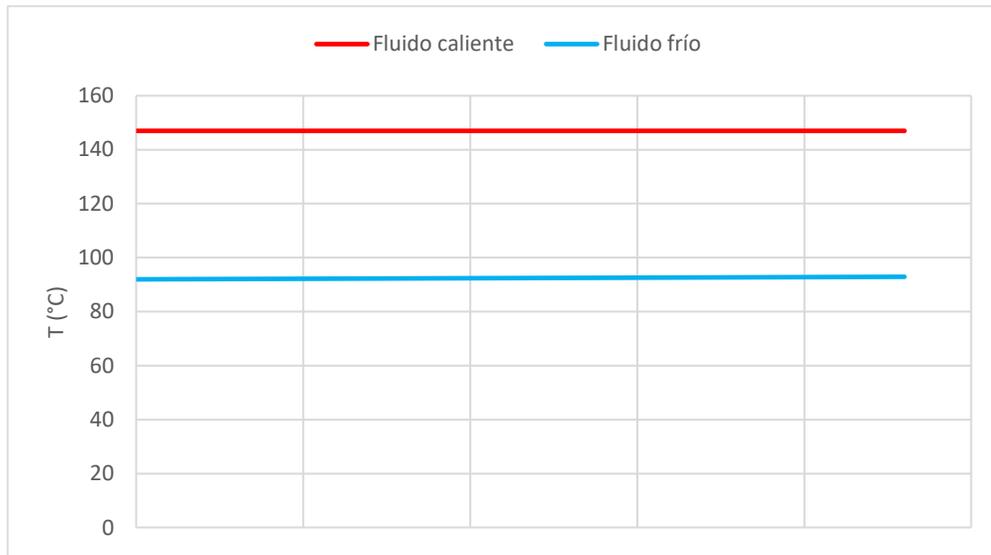


Figura 30. Perfil de temperaturas del EV-1 (Etapa 2).

Para el planteamiento del balance de materia de la caldera se consideró una caja negra, debido a que el equipo es un servicio auxiliar y no se requiere el balance de materia y energía de forma detallada para el análisis del proceso. Entonces, se consideró que la corriente 7 es igual a la 8 en términos de flujo másico y la corriente 18 es la obtenida por la ecuación 54.

Finalmente, se determinó las corrientes involucradas al inicio del proceso a régimen permanente. La corriente 5 se determinó experimentalmente a través del RM-1, de donde se obtuvo un flujo volumétrico. También se determinó la densidad a la temperatura medida a la entrada del proceso:

*Ecuación 62 (Dickey, 1991)*

$$\text{Densidad del agua} \left( \frac{kg}{m^3} \right) = \left( 62.7538 - ((3.5347 * 10^{-3}) * T) - ((4.8193 * 10^{-5}) * T^2) \right) * \left( \frac{1}{2.20462} \right) * \left( \frac{1}{0.3048^3} \right)$$

A partir de la densidad de la ecuación 62 y el flujo volumétrico obtenido experimentalmente, se determinó el flujo másico de la corriente 5:

*Ecuación 63*

$$\text{Flujo másico} \left( \frac{kg}{h} \right) = \text{Densidad del agua} \left( \frac{kg}{m^3} \right) * \text{Flujo volumétrico} \left( \frac{m^3}{s} \right) * 3600$$

A partir de la ecuación 63 se determinó el flujo molar de la corriente 5, considerando su flujo másico y el peso molecular del agua:

*Ecuación 64*

$$\text{Flujo molar} \left( \frac{\text{kgmol}}{\text{h}} \right) = \frac{\text{Flujo másico} \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)}{\text{Peso molecular del agua} \left( \frac{\text{kg}}{\text{kgmol}} \right)}$$

Se consideró que la corriente 5 es igual a la corriente 6 (ecuación 65), pues en la etapa operativa a régimen permanente del evaporador, la división de la corriente 20 no existe.

*Ecuación 65*

$$\text{Corriente 5} = \text{Corriente 6}$$

Se prosiguió a la determinación de la corriente 7, considerando las corrientes 6 y 27 en términos de flujo másico como se muestra en la ecuación 66:

*Ecuación 66*

$$\text{Flujo másico}_{C7} \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) = \text{Flujo másico}_{C6} - \text{Flujo másico}_{C27}$$

A partir de la ecuación 66 se determinó el flujo molar de la corriente 7 de la siguiente forma:

*Ecuación 67*

$$\text{Flujo molar} \left( \frac{\text{kgmol}}{\text{h}} \right) = \frac{\text{Flujo másico} \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)}{\text{Peso molecular del agua} \left( \frac{\text{kg}}{\text{kgmol}} \right)}$$

A partir de la temperatura de la corriente 7, determinada experimentalmente por un medidor antes de ingresar al tratamiento de zeolitas, se calculó la densidad del agua:

*Ecuación 68 (Dickey, 1991)*

$$\text{Densidad del agua} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = \left( 62.7538 - ((3.5347 * 10^{-3}) * T) - ((4.8193 * 10^{-5}) * T^2) \right) * \left( \frac{1}{2.20462} \right) * \left( \frac{1}{0.3048^3} \right)$$

A partir de la densidad de la ecuación 68 se determinó el flujo volumétrico de la corriente 7:

*Ecuación 69*

$$\text{Flujo volumétrico} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) = \frac{\text{Flujo másico} \left( \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right)}{\text{Densidad del vapor de agua} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)}$$

A partir de esto se determinó que, en términos de flujo másico, molar y volumétrico, las corrientes 7 y 8 son iguales, exceptuando que sus presiones son diferentes debido al paso por la bomba P-1.

**Anexo 3. Hoja de datos de los equipos del proceso de generación de agua destilada.**

HOJA DE DATOS DE BOMBA CENTRÍFUGA						
PARA	FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM		NO. DE TRABAJO		NA	
PLANTA	LABORATORIO DE INGENIERÍA QUÍMICA		NO. DE LA BOMBA		P-1	
LOCALIZACIÓN	CIRCUITO EXTERIOR S/N, COYOACÁN, CD. UNIVERSITARIA		NO. UNIDADES		1	
SERVICIO	AGUA DESTILADA		ACCIONAMIENTO DEL MOTOR		CA	
PROVEEDOR-CALIBRE Y MODELO	SENTINEL-NA-T6		NO. DE SERIE		780	
TIPO	TURBINA					
CONDICIONES DE OPERACIÓN						
FLUIDO	AGUA SUAVE	FLUJO (M <sup>3</sup> /S)	0.001	NPSH DE PROVECHO	1.364	FT FLUIDO
TEMPERATURA DE LA BOMBA (K)	290.150	FLUJO DE DISEÑO	NA	NPSH REGULAR	NA	FT AGUA
GRAVEDAD ESPECÍFICA (KG/M <sup>3</sup> )	998.651	PRESIÓN DE DESCARGA (PA)	588399.000	NPSH REGULAR	NA	FT FLUIDO
PRESIÓN DE VAPOR (PA)	1913.141	PRESIÓN DE SUCCIÓN (PA)	176519.700			
VISCOSIDAD (KG/S M)	0.001	ΔP (PA)	411879.300			
MANEJO						
MOTOR	3.00	HP	85	RPM		
VOLTS FASE CICLO	220-440 V, 3 FASES, 50-60 Hz					
NOTAS						
MOTOR DE TIPO TRIFÁSICO						

*Figura 31. Hoja de datos de la bomba P-1.*

HOJA DE ESPECIFICACIÓN DE UN INTERCAMBIADOR				
CLIENTE	FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM		NO. TRABAJO	NA
DIRECCIÓN	CIRCUITO EXTERIOR S/N, COYOACÁN, CD. UNIVERSITARIA		NO. REFERENCIA	NA
LOCALIZACIÓN DE LA PLANTA	LABORATORIO DE INGENIERÍA QUÍMICA		NO. CONSULTA	NA
UNIDAD DE SERVICIO	EVAPORADOR DE LA DESTILADORA DE AGUA		FECHA	27/06/2023
TAMAÑO (M <sup>2</sup> )	0.6126	TIPO	CORAZA Y TUBOS (CALANDRIA)	NO. ARTÍCULO
SUPERFICIE BRUTA POR UNIDAD	-	CARCASAS POR UNIDAD	1	CONECTADA EN
				LÍNEA 18
			SUPERFICIE POR CORAZA	ND
RENDIMIENTO DE UNA UNIDAD				
	LADO CORAZA		LADO TUBOS	
FLUIDO A CIRCULAR	VAPOR DE CALENTAMIENTO		AGUA CALIENTE	
FLUIDO TOTAL A LA ENTRADA (KG/S M <sup>3</sup> /S)	0.043	0.018	0.043	4.506E-05
VAPOR (KG/S)	-		-	
LÍQUIDO (KG/S)	-		0.043	
VAPOR (SERVICIO)	0.043		-	
NO CONDENSABLES	-		-	
FLUIDO VAPORIZADO O CONDENSADO (KG/S)	0.043			
CONDENSADO DE VAPOR	-			
DENSIDAD DEL LÍQUIDO (KG/M <sup>3</sup> )	-		963.890	
DENSIDAD DEL VAPOR (KG/M <sup>3</sup> )	2.362		-	
VISCOSIDAD DEL LÍQUIDO (KG/S M)	-		3.172E-04	
VISCOSIDAD DEL VAPOR (KG/S M)	1.378E-05		-	
PESO MOLECULAR DEL VAPOR (KG/KGMOL)	18.015		-	
CALOR ESPECÍFICO-LÍQUIDOS (BTU/LB °F)	-		1.005	
CALOR ESPECÍFICO-VAPORES (BTU/LB °F)	0.547		-	
TEMPERATURA DE ENTRADA (K)	420.332		365.150	
TEMPERATURA DE SALIDA (K)	365.150		366.025	
PRESIÓN DE OPERACIÓN (PA- KG/CM <sup>2</sup> )	441299.250	4.500	274586.200	2.800
NÚMERO DE PASOS POR CORAZA	-		-	
VELOCIDAD	-		-	
CAÍDA DE PRESIÓN	-		-	
RESISTENCIA A LA INCRUSTACIÓN	-		-	
CALOR INTERCAMBIADO (J/S)	91999.817	LMTD		55.182
NOTAS				

Figura 32. Hoja de datos del evaporador de calandria EV-1.

HOJA DE ESPECIFICACIÓN DE UN INTERCAMBIADOR				
CLIENTE	FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM		NO. TRABAJO	NA
DIRECCIÓN	CIRCUITO EXTERIOR S/N, COYOACÁN, CD. UNIVERSITARIA		NO. REFERENCIA	NA
LOCALIZACIÓN DE LA PLANTA	LABORATORIO DE INGENIERÍA QUÍMICA		NO. CONSULTA	NA
UNIDAD DE SERVICIO	CONDENSADOR DE LA DESTILADORA DEL AGUA		FECHA	27/06/2023
TAMAÑO (M <sup>2</sup> )	0.293	TIPO	CORAZA Y TUBOS	NO. ARTÍCULO
SUPERFICIE BRUTA POR UNIDAD	-	CARCASAS POR UNIDAD	1	CONECTADA EN
				LÍNEA 26
			SUPERFICIE POR CORAZA	ND
RENDIMIENTO DE UNA UNIDAD				
	LADO CORAZA		LADO TUBOS	
FLUIDO A CIRCULAR	VAPOR DE AGUA		AGUA DE ENFRIAMIENTO	
FLUIDO TOTAL A LA ENTRADA (KG/S M <sup>3</sup> /S)	0.043	0.092	0.658	0.001
VAPOR (KG/S)	0.043		-	
LÍQUIDO (KG/S)	-		0.658	
VAPOR (SERVICIO)	-		-	
NO CONDENSABLES	-		-	
FLUIDO VAPORIZADO O CONDENSADO (KG/S)	0.043			
CONDENSADO DE VAPOR	-			
DENSIDAD DEL LÍQUIDO (KG/M <sup>3</sup> )	-		998.089	
DENSIDAD DEL VAPOR (KG/M <sup>3</sup> )	0.475		-	
VISCOSIDAD DEL LÍQUIDO (KG/S M)	-		0.001	
VISCOSIDAD DEL VAPOR (KG/S M)	1.174E-05		-	
PESO MOLECULAR DEL VAPOR (KG/KGMOL)	18.015		-	
CALOR ESPECÍFICO-LÍQUIDOS (BTU/LB °F)	-		0.998	
CALOR ESPECÍFICO-VAPORES (BTU/LB °F)	1.005		-	
TEMPERATURA DE ENTRADA (K)	366.025		292.150	
TEMPERATURA DE SALIDA (K)	363.150		328.150	
PRESIÓN DE OPERACIÓN ( PA- KG/CM <sup>2</sup> )	78126.692	0.797	78126.692	0.797
NÚMERO DE PASOS POR CORAZA	1		2	
VELOCIDAD	-		-	
CAÍDA DE PRESIÓN	-		-	
RESISTENCIA A LA INCRUSTACIÓN	-		-	
CALOR INTERCAMBIADO (J/S)	99668.93	LMTD		52.04
NOTAS				
CLASIFICACIÓN TEMA				
CLAVE. NEN				
CLASE. B O C				

Figura 33. Hoja de datos del condensador CC-1.

<b>HOJA DE ESPECIFICACIÓN DE VÁLVULA DE ALIVIO O SEGURIDAD</b>	
<b>FECHA DE REVISIÓN</b>	NA
<b>NO. DE ARTÍCULO</b>	RV-1
<b>NO. DE ETIQUETA</b>	ND
<b>SERVICIO DE LA VÁLVULA</b>	DESFOGUE
<b>NO. TIPO Y MANUFACTURA</b>	ND
<b>NÚMERO DE VÁLVULAS REQUERIDAS</b>	1.00
<b>PRESIÓN NORMAL DEL SISTEMA (PSI)</b>	60.00
<b>TEMPERATURA NORMAL DEL SISTEMA (K)</b>	513.15
<b>CONDICIÓN ALTERADA QUE GOBIERNA</b>	MÁXIMA PRESIÓN
<b>PORCIENTO DE ACUMULACIÓN</b>	-
<b>CONDICIONES DEL TAMAÑO DE LA VÁLVULA</b>	
<b>FLUIDO QUE FLUYE</b>	VAPOR
<b>CANTIDAD DE FLUJO (KG/S)</b>	0.04
<b>DENSIDAD DEL VAPOR (KG/M<sup>3</sup>)</b>	0.47
<b>TEMPERATURA DEL FLUIDO (K)</b>	513.15
<b>VISCOSIDAD DEL FLUIDO (KG/S M)</b>	1.38E-05
<b>PRESIÓN DE AJUSTE (PSI)</b>	85.34
<b>PRESIÓN DE ENTRADA (PSI)</b>	60.00
<b>CONTRAPRESIÓN (PSI)</b>	-

*Figura 34. Hoja de datos de válvula de alivio o seguridad RV-1.*

<b>HOJA DE ESPECIFICACIÓN DE VÁLVULA DE ALIVIO O SEGURIDAD</b>	
<b>FECHA DE REVISIÓN</b>	NA
<b>NO. DE ARTÍCULO</b>	RV-2
<b>NO. DE ETIQUETA</b>	ND
<b>SERVICIO DE LA VÁLVULA</b>	DESFOGUE
<b>NO. TIPO Y MANUFACTURA</b>	MODELO 210-VAYREMEX
<b>NÚMERO DE VÁLVULAS REQUERIDAS</b>	1
<b>PRESIÓN NORMAL DEL SISTEMA (KG/CM<sup>2</sup>)</b>	2.80
<b>TEMPERATURA NORMAL DEL SISTEMA (K)</b>	365.15
<b>CONDICIÓN ALTERADA QUE GOBIERNA</b>	MÁXIMA PRESIÓN
<b>PORCIENTO DE ACUMULACIÓN</b>	-
<b>CONDICIONES DEL TAMAÑO DE LA VÁLVULA</b>	
<b>FLUIDO QUE FLUYE</b>	VAPOR
<b>CANTIDAD DE FLUJO (KG/S)</b>	0.04
<b>DENSIDAD DEL VAPOR (KG/M<sup>3</sup>)</b>	0.47
<b>TEMPERATURA DEL FLUIDO (K)</b>	365.15
<b>VISCOSIDAD DEL FLUIDO (KG/S M)</b>	1.17E-05
<b>PRESIÓN DE AJUSTE (KG/CM<sup>2</sup>)</b>	7.00
<b>PRESIÓN DE ENTRADA (KG/CM<sup>2</sup>)</b>	2.80
<b>CONTRAPRESIÓN (PSI)</b>	-
<b>ÁREA DE ORIFICO O DESCARGA (M<sup>2</sup>)</b>	7.80E-05

*Figura 35. Hoja de datos de válvula de alivio o seguridad RV-2.*

#### **Anexo 4. Memoria de cálculo del presupuesto para la caracterización del agua destilada.**

El cálculo de los costos de la tabla 11, se presenta a continuación. La primera determinación fue la de gasto total de reactivos, ésta se realizó a partir de la cotización de reactivos antes mencionada; primero se determinó el costo por unidad en términos de volumen o masa según correspondiera, como se muestra en las ecuaciones 70 y 71:

##### *Ecuación 70*

$$\text{Costo por unidad} \left( \frac{\$}{\text{mL}} \right) = \frac{\text{Costo de reactivo cotizado} (\$)}{\text{Presentación (mL)}}$$

##### *Ecuación 71*

$$\text{Costo por unidad} \left( \frac{\$}{\text{g}} \right) = \frac{\text{Costo de reactivo cotizado} (\$)}{\text{Presentación (g)}}$$

Una vez obtenido el costo por unidad, se prosiguió a calcular la cantidad de reactivo utilizada por muestra; para este caso hubo varias formas de determinarla dependiendo del parámetro:

##### *Ecuación 72*

$$\text{Cantidad de reactivo utilizada por muestra (g)} = \frac{\text{Cantidad de reactivo para la dilución (g)}}{\text{Volumen de dilución (mL)}} * \text{Cantidad utilizada para el parámetro (mL)}$$

Para el caso de la ecuación 72, se determina la cantidad de reactivo en términos de masa a partir de la cantidad de reactivo que se necesita para la dilución, y la cantidad que se necesita para el parámetro en términos de volumen. Por ejemplo, este caso es para la determinación del cloruro de potasio para la determinación de la conductividad.

##### *Ecuación 73*

$$\text{Cantidad de reactivo utilizada por muestra (mL)} = \frac{\text{Cantidad de reactivo para la dilución (mL)}}{\text{Volumen de dilución (mL)}} * \text{Cantidad utilizada para el parámetro (mL)}$$

En la ecuación 73, se determina la cantidad de reactivo en términos de volumen a partir de la cantidad de reactivo que se necesita para la dilución y la cantidad que se necesita para el parámetro en términos de volumen. Por ejemplo, este caso es para la determinación del ácido sulfúrico para la determinación de sustancias oxidables.

#### *Ecuación 74*

$$\text{Cantidad de reactivo utilizada por muestra (g)} = \frac{\text{Cantidad de reactivo para la dilución (g)}}{\text{Volumen de dilución (g)}} * \text{Cantidad utilizada para el parámetro (g)}$$

En la ecuación 74, se determina la cantidad de reactivo en términos de masa a partir de la cantidad de reactivo que se necesita para la dilución másica y la cantidad que se necesita para el parámetro en términos de masa. Por ejemplo, este caso es para la determinación de indicador negro de eriocromo T para la determinación de dureza total.

#### *Ecuación 75*

$$\text{Cantidad de reactivo utilizada por muestra (g)} = \text{Cantidad utilizada para el parámetro (g)}$$

#### *Ecuación 76*

$$\text{Cantidad de reactivo utilizada por muestra (mL)} = \text{Cantidad utilizada para el parámetro (mL)}$$

En las ecuaciones 75 y 76 se determina la cantidad de reactivo utilizada por muestra en bruto, es decir, es igual a la cantidad requerida para la determinación por parámetro sin ser diluida. Esto se aplica para el bicarbonato de sodio o el ácido nítrico para la determinación de sílice y dureza total respectivamente.

Para el caso del pH y el gasto de las soluciones amortiguadoras para la calibración, se contempló su uso cada 6 meses solamente, considerando que se ocupan 100 mL de cada solución por cada calibración. Por tanto, la cantidad total por año para este caso es de 200 mL de cada solución.

#### *Ecuación 77*

$$\text{Cantidad de reactivo utilizada por prueba (g)} = \text{Cantidad de reactivo utilizada por muestra (g)} * \# \text{ de muestras por parámetro}$$

### *Ecuación 78*

$$\text{Cantidad de reactivo utilizada por prueba (mL)} = \text{Cantidad de reactivo utilizada por muestra (mL)} * \# \text{ de muestras por parámetro}$$

A partir de la cantidad de reactivo necesaria por muestra se determinó la cantidad de reactivo necesaria por prueba donde una prueba engloba la caracterización del parámetro por triplicado y el blanco si aplica para el parámetro, como se muestra en las ecuaciones 77 y 78. Existen algunas excepciones a la ecuación en donde la cantidad de reactivo utilizada por prueba es igual a la utilizada por muestra esto debido a que la dilución ocupada para el parámetro no se puede almacenar o el reactivo solo se ocupa una sola vez para el parámetro debido a condiciones experimentales específicas, por ejemplo, está el caso de la tioacetamida y el nitrato de potasio para la determinación de metales pesados y nitratos respectivamente.

### *Ecuación 79*

$$\text{Cantidad de reactivo utilizada anual (g)} = \text{Cantidad de reactivo utilizada por prueba (g)} * 12$$

### *Ecuación 80*

$$\text{Cantidad de reactivo utilizada anual (mL)} = \text{Cantidad de reactivo utilizada por prueba (mL)} * 12$$

A partir de la cantidad de reactivo necesaria por prueba se determinó la cantidad de reactivo anual como se indica en las ecuaciones 79 y 80, proponiendo que la caracterización se realice de manera mensual, por lo que se multiplico por 12 debido a la cantidad de meses en un año. En este cálculo existen algunas excepciones debido a que algunos reactivos no se ocupan directamente para la determinación del parámetro, sino son estándares para algunas disoluciones ocupadas; es el caso del carbonato de calcio o el carbonato de sodio para el caso de la dureza total y de la alcalinidad, respectivamente.

### *Ecuación 81*

$$\text{Cantidad de reactivo real utilizada anual (g)} = \text{Cantidad de reactivo para la dilución (g)}$$

### *Ecuación 82*

$$\text{Cantidad de reactivo real utilizada anual (mL)} = \text{Cantidad de reactivo para la dilución (mL)}$$

Debido a que las disoluciones químicas tienen una duración de vida útil de un año, se determinó la cantidad real de reactivo utilizada anualmente. Como se presenta en las ecuaciones 81 y 82, se determinó como la cantidad de reactivo que se ocupa para la preparación de la dilución de cada parámetro, ya que se deben de preparar cada año.

### *Ecuación 83*

$$\text{Costo de reactivo por prueba (\$)} = \text{Cantidad de reactivo utilizada por prueba (g)} * \text{Costo por unidad} \left( \frac{\$}{g} \right)$$

### *Ecuación 84*

$$\text{Costo de reactivo por prueba (\$)} = \text{Cantidad de reactivo utilizada por prueba (mL)} * \text{Costo por unidad} \left( \frac{\$}{mL} \right)$$

Obtenida la cantidad de reactivo ocupada por muestra, por prueba y anualmente, se prosiguió al gasto de cada reactivo, por tanto, se multiplicó el costo por unidad de reactivo, determinadas en las ecuaciones 70 y 71, por la cantidad de reactivo en cada prueba (ecuaciones 83 y 84) o por la cantidad de reactivo anual (ecuaciones 85 y 86). Estos costos por cada reactivo se sumaron, lo cual corresponde al gasto total de cada parámetro por prueba y por año como se presentan en las columnas 2 y 3 de la tabla 11.

### *Ecuación 85*

$$\text{Costo anual de reactivo(\$)} = \text{Cantidad de reactivo real utilizada anual (mL)} * \text{Costo por unidad} \left( \frac{\$}{mL} \right)$$

### *Ecuación 86*

$$\text{Costo anual de reactivo(\$)} = \text{Cantidad de reactivo real utilizada anual (g)} * \text{Costo por unidad} \left( \frac{\$}{g} \right)$$

Para la determinación del costo de los equipos, reportados en la tabla 11, se consideró un cálculo previo para el caso de los equipos cotizados en el año 2021, como se expone en la ecuación 87, donde se contempla la inflación a mayo del presente año 2023 (Secretaría de Hacienda y Crédito Público, 2023).

### *Ecuación 87*

$$\text{Costo de equipo}_{\text{Año 2023}} (\$) = \text{Costo de equipo}_{\text{Año 2021}} (\$) + [\text{Costo de equipo}_{\text{Año 2021}} * 5.84\%]$$

Una vez obtenidos los costos de las cotizaciones del año 2021, se obtuvieron los costos de equipos faltantes considerando costos del año 2023. Entonces, para todos los costos de equipo se consideró un 10% de depreciación por 10 años de vida útil de los equipos, como se muestra en la ecuación 88.

### *Ecuación 88*

$$\text{Costo de equipo} (\$) = \text{Costo de equipo}_{\text{Año 2023}} (\$) - [\text{Costo de equipo}_{\text{Año 2023}} * 10\%]$$

Por último, se sumó el costo de equipos por cada parámetro considerando que los equipos empleados en varios parámetros sólo se sumaron para uno. Por ejemplo, para el caso del uso del multiparamétrico, sólo se consideró en el costo del pH y para el parámetro de la conductividad se omitió. Además, no se consideraron los equipos ya instalados que se mencionaron anteriormente, por tanto, así se obtuvo el gasto total de equipos reportados en la tabla 11.

### *Ecuación 89*

$$\text{Costo de material} (\$) = \text{Costo de material}_{\text{Año 2023}} (\$) - [\text{Costo de material}_{\text{Año 2023}} * 20\%]$$

Para la determinación del material del laboratorio, se realizó cotización por parte de la empresa El Crisol, S.A. de C.V., con quien se obtuvieron todos los costos del presente año. Como se indica en la ecuación 89, para el caso de este material que en su mayoría es de vidrio se decidió considerar el 20% de depreciación como lo establece el Diario Oficial de la Federación (Secretaría de Gobernación, 2023). Por último, se sumaron todos los costos del material por parámetro obteniendo así el gasto total reportado en la tabla 11.

**Anexo 5. Manual de técnicas analíticas para la caracterización del agua destilada  
producida en el Laboratorio de Ingeniería Química**



Universidad Nacional Autónoma de México

Manual de Técnicas Analíticas para la  
caracterización de agua destilada

Departamento de Ingeniería Química

Facultad de Química

Realizado por

Eva Reyna Serrato Durán

IQ. Claudia Julieta Espinosa Pérez

M en I. María Rafaela Gutiérrez Lara

---

{ 1 }

*Figura 36. Portada del manual de técnicas analíticas para la caracterización del agua destilada.*

# INDICE

Objetivo .....	2
Alcance .....	3
Introducción .....	3
Determinación de pH .....	3
Determinación de conductividad .....	6
Determinación de sustancias oxidables .....	11
Determinación de metales pesados .....	13
Determinación de nitratos.....	17
Determinación de dureza total.....	20
Determinación de dureza de calcio .....	25
Determinación de sílice .....	29
Determinación de alcalinidad .....	33
Anexo 1. Calibración del multiparamétrico para medición de pH.....	37
Anexo 2. Calibración del multiparamétrico para la determinación de la conductividad..	38
Anexo 3. Calibración del espectrofotómetro para la determinación de nitratos .....	39
Anexo 4. Calibración del espectrofotómetro para la determinación de sílice.....	40
Referencias .....	42

*Figura 37. Contenido del manual de técnicas analíticas para la caracterización del agua destilada.*

## Anexo 6. Diagrama de flujo de proceso y Diagrama de tubería e instrumentación

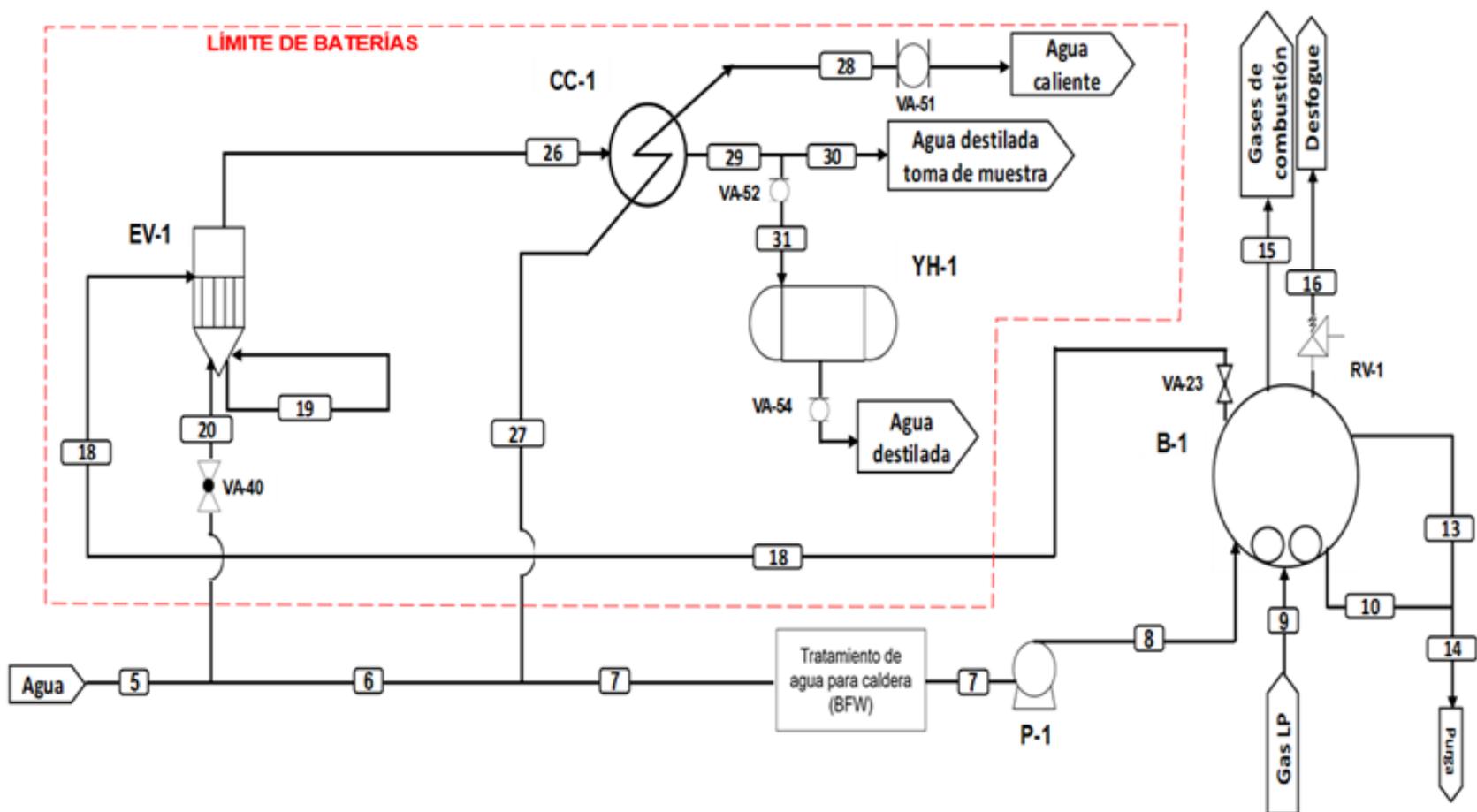


Figura 38. Diagrama de Flujo de Proceso de la producción de agua destilada en el Laboratorio de Ingeniería Química

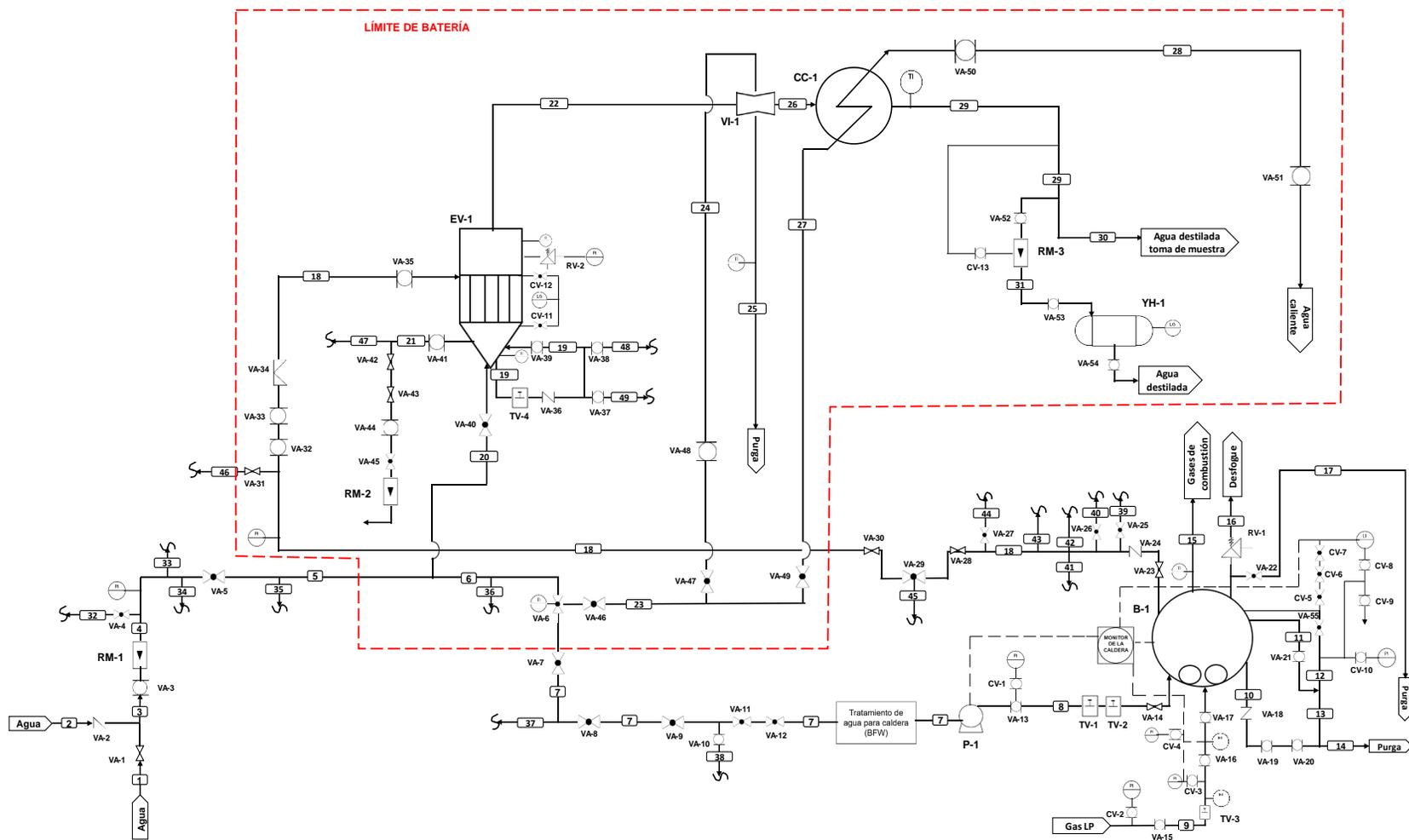


Figura 39. Diagrama de Tubería e Instrumentación del proceso de producción del agua destilada en el Laboratorio de Ingeniería Química.