



Facultad de Ciencias Técnicas
Departamento de Química e Ingeniería Química

**“Propuesta preliminar de una planta de ósmosis inversa para el
tratamiento de agua de alimentación a los generadores de vapor de la
Planta de Procesamiento de Crudos”**

**TRABAJO DE DIPLOMA PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO**

Autora: Rachel Pardo Reina.

Tutor: Dr.C. Yoney López Hervis.

Dr.C. Agustín Benítez Hernández.

**Matanzas
2020**



“¿Y qué juventud queremos? ¿Queremos, acaso, una juventud que simplemente se concrete a oír y a repetir? ¡No! Queremos una juventud que piense.”

Fidel Castro Ruz

Nota de aceptación

Presidente del Tribunal

Miembro del Tribunal

Miembro del Tribunal

Calificación

Ciudad, fecha

Declaración de autoridad

Yo, Rachel Pardo Reina, declaro ser la única autora de esta investigación realizada en la Universidad de Matanzas, como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Químico y autorizo que la misma sea utilizada por la mencionada institución como material de consulta. Para que así conste:

Nombre y Apellidos

Firma

Dedicatoria

Este trabajo de diploma está especialmente dedicado a mi familia y en especial a mis padres por ser el impulso necesario para intentar convertirme en un profesional.

Agradecimientos:

Sin duda este constituye el logro más valioso de mi vida, y no puedo dejar de agradecer a las personas que mantuvieron su apoyo incondicional, haciendo la estancia más grata en este largo y duro camino.

Agradecer primordialmente a mis padres, por el amor infinito brindado y darme el mejor de los ejemplos, sin su guía, rigor y paciencia, nada sería posible.

Agradecer a cada miembro de mi familia: mis hermanos, tíos y primos, por creer en mí y hacerme sentir orgullosa de cada paso alcanzado.

A mis abuelas, por regalarme esas hermosas sonrisas y rostros de satisfacción, cuando hablaban de su nieta la ingeniera química.

Agradecer eternamente a mi marido Reynaldo, por ser mi compañía permanente, mi apoyo incondicional, y mi mayor consejero.

Agradecer a mis niñas queridas: Dani, Ele, Tay, Arle, Ely y mi amigo Irán, por ser esas ganas inmensas de querer asistir cada día, el sostén tras cada momento de tristeza y el mejor regalo que he obtenido en este tránsito, cada uno es considerado parte de mi familia para siempre.

Agradecer a mis tutores Yoney y Agustín, por no perder la paciencia, por darme el mejor trato y ayuda absoluta, por dedicarse tanto como yo a la realización de este proyecto, por poner a mi disposición todos sus conocimientos.

Agradecer al claustro de profesores por sentar en mí, las bases de un profesional.

A mi grupo en general, por darme la oportunidad de formar parte del mejor grupo de Ingeniería Química.

Resumen

La siguiente investigación tiene como objetivo proponer el diseño preliminar de una planta de ósmosis inversa para el tratamiento de aguas de la Planta de Procesamiento de Crudos. Esto es necesario porque, debido a la salinización de la fuente de abasto de agua y la falta de partes y piezas de repuesto de la actual planta de tratamiento por intercambio iónico se conoce que, a partir de 438 ppm de la dureza total del agua cruda, la planta de tratamiento de agua para la generación de vapor, sin la recuperación de condensado, no garantiza la demanda total de vapor que se requiere. Por estas razones, es necesario determinar, las propiedades físico químicas del agua cruda y, a partir de estos resultados, obtener los parámetros de diseño y operación de una planta de ósmosis inversa, determinar la configuración del sistema, mejorar en aproximadamente 25 % la calidad del agua y establecer los indicadores de factibilidad económica de la inversión a realizar. Para darle solución a lo anterior descrito se utiliza el *software* ROSA.

Abstract:

The following research aims to propose the preliminary design of a reverse osmosis plant for the treatment of water from the Planta de Procesamiento de Crudos. This is necessary because, due to the salinization of the water supply source and the lack of parts and spare parts of the current ion exchange treatment plant, it is known that, from 438 ppm of the total hardness of the raw water, the water treatment plant for steam generation, without the recovery of condensate, does not guarantee the total demand for steam that is required. For these reasons, it is necessary to determine the physical-chemical properties of raw water and, from these results, obtain the design and operation parameters of a reverse osmosis plant, determine the system configuration, improve quality by approximately 25 % of water and establish the indicators of economic feasibility of the investment to be made. ROSA software is used to solve the above described.

Tabla de contenido

Introducción	1
Capítulo 1: Análisis bibliográfico	3
1.1 Importancia de la calidad del agua tratada para la generación de vapor	3
1.1.1 Impurezas del agua para generación de vapor	3
1.1.2 Problemas más frecuentes en las calderas al utilizar agua no tratada.....	6
1.2 Métodos de tratamiento de agua para generación de vapor	8
1.2.1 Filtración y Ultrafiltración	8
1.2.2 Ablandamiento e intercambio iónico	9
1.2.3 Ósmosis inversa y nanofiltración	9
1.2.4 Desaireación y desgasificación	10
1.2.5 Coagulación y precipitación química.....	10
1.3 Principios, generalidades y aplicaciones de la ósmosis inversa	11
1.4 La unidad de ósmosis inversa	15
1.4.1 Agrupación de módulos	15
1.4.2 Agrupación de etapas	15
1.4.3 Agrupación de sistemas.....	16
1.5 Tipos de membranas y características generales	16
1.5.1 Configuración de membranas de ósmosis inversa	18
1.5.2 Área activa de la membrana	20
1.5.3 Clasificación de membranas según su presión de trabajo:.....	20
1.6 <i>Dow Chemical</i>	20
1.7 El programa ROSA	22
1.8 Conclusiones parciales del capítulo	22
Capítulo 2: Materiales y Métodos	24
2.1 Descripción del Caso de Estudio	24
2.2 Metodología que utiliza el software ROSA de <i>Dow Water Solutions Company</i> para el dimensionamiento de la unidad de ósmosis inversa	25
2.2.1 Variables de interés en ROSA.....	25
2.2.2 Análisis del agua de alimentación	29
2.2.3 Características y calidad deseadas del agua producto	32
2.2.4 Selección de la membrana.....	33

2.2.5 Balance de materia inicial	33
2.2.6 Porcentaje de Rechazo de Sales	34
2.2.7 Porcentaje de recuperación.....	35
2.2.8 Cálculo de los sólidos totales disueltos (TDS).....	35
2.2.9 Cálculo de la presión osmótica.....	36
2.2.10 Cálculo del número de membranas y tubos de presión	38
2.2.11 Normalización del sistema	38
2.2.12 Cálculo de los factores correctores.....	39
2.2.13 Cálculo de la presión de operación	40
2.3 Selección del sistema de recuperación de energía	41
2.3.1 Sistema de recuperación con turbina Pelton	41
2.3.2 Sistema de recuperación con intercambiadores de presión:	42
2.4 Metodología para determinar la factibilidad económica de la propuesta	43
2.4.1 Parámetros Económicos: el NPV	44
2.4.2 <i>Cost Analysis</i> (Análisis de Costos).....	44
Conclusiones.....	56
Bibliografía.....	57
Anexos.....	63

Introducción

La principal función de La Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro (EPEP – Centro) es la de recibir el petróleo por oleoductos y transporte terrestre y entregarlo en calidad realizando el bombeo a la Empresa Comercializadora de Combustibles en Matanzas. Para lograr la calidad requerida del petróleo se realiza un tratamiento termoquímico en el que es de suma importancia la generación de vapor.

Para la producción de vapor en la Planta de Procesamiento de Crudos (PPC) se cuenta con cinco generadores de vapor. El tratamiento previo al agua de alimentación a calderas es vital, pues alarga la vida útil de las mismas, y hace que se genere vapor de la manera más eficiente.

Una de las principales características a eliminar del agua es la dureza, pues es la causante de incrustaciones en los generadores de vapor que perjudican la transferencia de calor en el interior de los mismos.

Existen diversos métodos utilizados a nivel mundial para el tratamiento de las aguas, uno de los más utilizados son las columnas suavizadoras, las cuales contienen resinas capaces de eliminar la dureza del agua a través del intercambio iónico. Este precisamente es el instalado en la planta de tratamiento de agua de la Planta de Procesamiento de Crudos de EPEP – Centro, el cual es el encargado de suministrar el agua que necesitan los generadores para producir vapor.

El agua a tratar se extrae desde los pozos profundos del acuífero de Varadero, los cuales presentan una gran dureza en sus aguas. Debido al incremento de la sequía en nuestro país, esta dureza ha alcanzado en los últimos años valores que sobrepasan los 500 mg/L, lo cual perjudica la eficiencia de las columnas suavizadoras. Esto significa que se obtenga menor cantidad de agua en la planta de tratamiento, lo cual es una situación alarmante para la empresa para poder garantizar la demanda de vapor que requiere el proceso. Para paliar esta situación, una parte del condensado del vapor producido se reutiliza nuevamente por las calderas junto con el agua tratada.

La recuperación del condensado se logra en las condiciones normales del proceso, pero han existido problemas en el mismo donde no se ha podido utilizar el condensado, como contaminación en las líneas, o rotura de alguna de ellas, por lo que se ha abastecido a los

generadores de vapor solo con el agua tratada obtenida en las columnas de la planta de tratamiento.

Por otra parte, en la empresa desde hace más de dos años existe un déficit en el suministro de partes, piezas e insumos (fundamentalmente resinas) para el correcto funcionamiento de la planta de tratamiento de agua existente. Los ablandadores funcionan con un volumen de resina de alrededor de un 10 % más que el de diseño porque no garantiza la calidad del agua requerida.

De acuerdo con los resultados obtenidos por Nuñez (2017) la generación de vapor se encuentra subordinada a la recuperación de condensado; o sea, si en algún momento se afecta la recuperación de condensado, se verá comprometida la generación de vapor y, por ende, el tratamiento del crudo en la planta. Por estas razones, se propone el siguiente **Problema**:

¿Será factible técnica y económicamente la utilización de una planta de ósmosis inversa para el tratamiento de agua de alimentación a los generadores de vapor de la Planta de Procesamiento de Crudos?

HIPÓTESIS: Si se diseña un proceso de tratamiento de agua por ósmosis inversa se podrán garantizar los volúmenes de agua necesarios para la generación de vapor con las características técnicas requeridas y que sea económicamente factible.

OBJETIVO: Proponer el diseño preliminar de una planta de ósmosis inversa para el tratamiento de agua en la PPC.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

1. Caracterizar el agua utilizada en la generación de vapor en la PPC.
2. Seleccionar, mediante un análisis bibliográfico, el tipo de membrana y configuración de la planta de ósmosis inversa.
3. Determinar los parámetros de diseño y operación de una planta de ósmosis inversa para el tratamiento de agua.
4. Analizar económicamente la propuesta

Capítulo 1: Análisis bibliográfico

En este capítulo se aborda la importancia de la calidad del agua tratada y los métodos de tratamiento para la generación de vapor; como son: filtración y ultrafiltración, ablandamiento e intercambio iónico, ósmosis inversa y nanofiltración, desaireación y degasificación y coagulación y precipitación química, con énfasis en los principios, generalidades y aplicaciones de la ósmosis inversa. Se tratan, además, los tipos de membranas y sus características generales, así como, de la compañía *Dow Chemical* encargada de la elaboración de membranas y creador del programa ROSA.

1.1 Importancia de la calidad del agua tratada para la generación de vapor

Es de vital importancia la calidad del agua utilizada en los generadores de vapor, pues, en su estado natural, el agua contiene elementos que son considerados contaminantes y de no ser eliminados pueden afectar el rendimiento de la caldera.

1.1.1 Impurezas del agua para generación de vapor

El agua procede de los ríos, lagos, pozos y agua de lluvia. Para los efectos de alimentación de generadores de vapor y fines industriales tienen primordial importancia los ríos y pozos. Por la misma índole de su procedencia no se puede evitar que arrastre y disuelva impurezas que la hacen no apta para el consumo humano e industrial (Abarca, 2018).

Entre las impurezas que suele traer consigo el agua sin tratamiento proveniente de las fuentes descritas figuran las siguientes: sólidos en suspensión, líquidos no solubles en agua (por ejemplo: aceite), colorantes, microorganismos, sustancias semicoloidales, gases disueltos, sales minerales disueltas (Kremer *et al.*, 2011; Oelker, 2016). A continuación, se puntualizan los diferentes tipos de impurezas encontradas repetidamente en aguas naturales y que más interesan desde el punto de vista de control y tratamiento de agua para alimentación de generadores de vapor:

Sólidos disueltos y suspendidos: Corresponden a sales minerales solubles, procedentes de las rocas con las cuales ha estado en contacto el agua. Los sólidos disueltos abarcan una amplia gama de compuestos minerales que son capaces de disociarse a sus formas iónicas. Se encuentran en el seno del agua y no pueden separarse por medios mecánicos. Pueden presentarse también en forma molecular como sílice (Younos *et al.*, 2009).

Sales que aportan dureza: Se denomina dureza al contenido de calcio y magnesio presente en el agua. Todos los cationes, excepto el sodio y el potasio, también producen dureza, pero

generalmente su presencia es tan pequeña que siempre son ignorados como tal. Las sales de calcio y magnesio son altamente insolubles a altas temperaturas y alcalinidades, por lo que forman depósitos minerales sobre las superficies de intercambio de calor, que ocasionan puntos calientes y posterior ruptura de los tubos, por lo que deben ser eliminadas. Su concentración se indica usualmente en partes por millón (ppm). Los iones de calcio y magnesio pueden estar asociados a iones carbonatos y bicarbonatos en cuyo caso se denominan dureza temporal o asociados a iones sulfato y cloruros, lo que se denomina entonces dureza permanente. El tipo de dureza en un agua natural dependerá de su procedencia (Karlsson, 2017).

- Sílice: en el agua de alimentación puede formar incrustaciones duras (silicatos) o de muy baja conductividad térmica (silicatos de calcio y magnesio) (Ortiz y Tavera, 2013). En ausencia de alcalinidad, forma incrustaciones muy fuertes que sólo pueden ser eliminadas por medios mecánicos, ácido fluorhídrico u otros compuestos del flúor: La solubilidad de la sílice aumenta con la alcalinidad (Ramírez *et al.*, 2007).
- Hierro: rara vez se encuentran en las aguas superficiales, ya que en su forma soluble $\text{Fe}^{2+}_{(ac)}$ sólo se encuentra en aguas exentas de oxígeno disuelto. Por lo tanto, es más frecuente en las aguas de pozos, debido a los estratos por los que ha pasado. Cuando pasa de su forma ferrosa a férrica por acción de un agente oxidante forma depósitos voluminosos, los cuales ocasionan taponamientos y son altamente aislantes. La presencia de oxígeno promueve la oxidación del ion ferroso a ion férrico, el cual precipita como hidróxido a un pH superior a 4,5 (Kritzberg *et al.*, 2012).

El hierro en aguas industriales genera incrustaciones en el interior de las maquinarias y las tuberías de uso industrial, lo que produce obstrucciones. Esto hace que se restrinja el flujo de agua dentro de las tuberías. Como consecuencia de lo anterior las bombas encargadas de mantener un flujo de agua hacia los procesos tienen un mayor desgaste y utilizan más energía. Otra consecuencia del hierro en las aguas de uso industrial es el deterioro de la maquinaria utilizada en los diferentes procesos de producción. Además, puede hacer que el pH de estas aguas disminuya. Estas variaciones de pH pueden causar problemas en los diferentes equipos utilizados en los procesos de producción y en el producto final. En las industrias que utilicen calderas, la presencia de óxidos de hierro ocasiona dificultades en la transmisión del calor y un potencial para la ruptura de los tubos, debido a las elevadas temperaturas que en esta unidad se manejan (Duarte *et al.*, 2015).

- Manganese: al igual que el hierro, sólo se encuentra en aguas subterráneas, aunque con menor frecuencia. Su tendencia es a oxidarse y precipitar como dióxido de manganeso (CDW, 2016).
- Cloruros: son compuestos altamente solubles y abundantes en las aguas naturales. Los problemas que ocasionan están principalmente relacionados con la corrosión (Mullaney *et al.*, 2009).
- Sulfatos: son altamente solubles, pero el CaSO_4 (s), puede formar incrustaciones cuando su solubilidad es excedida. También son corrosivos (Feely *et al.*, 2008).
- Oxígeno: el aire atmosférico es la fuente de este gas, el cual tiene una solubilidad de hasta nueve ppm a temperatura ambiente y presión atmosférica. Su presencia en el agua es el factor determinante en muchos procesos de corrosión de componentes metálicos. La presión y temperatura aumentan la velocidad con que se produce la corrosión (Steinle *et al.*, 2017).
- Dióxido de carbono: el dióxido de carbono, al igual que el dióxido, favorecen la corrosión. Este tipo de corrosión se manifiesta en forma de ranuras y no de tubérculos como los resultantes de la corrosión por oxígeno. La corrosión en las líneas de retorno de condensado generalmente es causada por el dióxido de carbono, que al disolverse en agua produce ácido carbónico. La corrosión causada por el ácido carbónico ocurrirá bajo el nivel del agua y puede ser identificada por las ranuras o canales que se forman en el metal (Cichowicz *et al.*, 2016; Smith *et al.*, 2020).
- Acidez: el pH representa las características ácidas o alcalinas del agua, por lo que su control es esencial para prevenir problemas de corrosión (bajo pH) y depósitos (alto pH) (Feely *et al.*, 2008).
- Aceite: el aceite en las calderas constituye una situación peligrosa. El aceite es un excelente aislante del calor y su presencia sobre las superficies expuestas a altas temperaturas puede producir serios sobrecalentamientos y daños a la caldera, además, favorece la formación de espuma y como consecuencia el arrastre del vapor (Guanche, 2016).
- Alcalinidad: representa la cantidad de carbonatos, bicarbonatos, hidróxidos y silicatos o fosfatos en el agua. La alcalinidad del agua de alimentación es importante, debido a que, representa una fuente potencial de depósitos (Feely *et al.*, 2008).

- Conductividad térmica: propiedad que permite controlar la cantidad de sales (iones) disueltas en el agua (Smith *et al.*, 2020).
- Material suspendido: formado principalmente por arcillas y polvo, casi siempre, en pequeñas partículas de un tamaño tal que no sedimentan rápidamente. A estas se le denominan coloides y su presencia está asociada al ensuciamiento con todas las consecuencias de obstrucción, corrosión y aislamiento (Feely *et al.*, 2008).

1.1.2 Problemas más frecuentes en las calderas al utilizar agua no tratada

Según Chávez *et al.* (2004); Nuñez (2017), la utilización de un agua sin el apropiado tratamiento previo en el ciclo de la planta puede provocar graves consecuencias como:

- Las incrustaciones en los tubos de las calderas
- La corrosión de las superficies metálicas de las calderas, calentadores y tuberías.
- El arrastre de partículas sólidas o líquidas.
- La cristalización en las costuras y juntas de domos y tubos de las calderas.

A continuación, se describen los problemas encontrados con mayor frecuencia en las calderas, al no tratarse adecuadamente el agua de alimentación.

Incrustaciones

Las incrustaciones corresponden a depósitos de carbonatos y silicatos de calcio y magnesio, formados debido a una excesiva concentración de estos componentes en el agua de alimentación y/o regímenes de purga insuficientes. La acción de dispersantes, lavados químicos o las dilataciones y contracciones de una caldera pueden soltar las incrustaciones, por lo que deben ser eliminadas de una caldera muy incrustada para prevenir su acumulación en el fondo del cuerpo de presión (Ashfaq *et al.*, 2020).

En el caso de que estas incrustaciones no sean removidas, se corre el riesgo de obstruir las líneas de purga de fondo, con lo que el problema puede tornarse aún más grave. La presencia de incrustaciones en una caldera es especialmente grave, debido a su baja conductividad térmica actúa como aislante térmico. Esto puede provocar problemas de refrigeración de las superficies metálicas y puede llegar a causar daños por sobrecalentamiento. A medida que aumenta el espesor de la capa de incrustaciones, para un mismo flujo de calor, aumenta la temperatura del metal. La formación de incrustaciones en una caldera puede ser prevenida, si se satisfacen los requerimientos del agua de alimentación de la caldera, tratar el agua de alimentación y mantener adecuados regímenes de purga (Kumari *et al.*, 2015; Matin *et al.*, 2019).

Corrosión

Las principales fuentes de corrosión en calderas son la corrosión por oxígeno y la corrosión cáustica. A continuación, se describe en que consiste cada uno de estos tipos de corrosión, cuáles son los factores que la favorecen, que aspecto tiene y de qué manera pueden ser prevenidas.

- **Corrosión por Oxígeno:** consiste en la reacción del oxígeno disuelto en el agua con los componentes metálicos de la caldera (en contacto con el agua), lo que provoca su disolución o conversión en óxidos insolubles. Los resultados de este tipo de corrosión son tubérculos de color negro, los que se forman sobre la zona de corrosión. La corrosión de tipo oxígeno se evita: externamente mediante el uso de desaireadores y químicamente mediante la utilización de productos químicos que se apoderan del oxígeno. Los productos químicos usados normalmente para este propósito son el sulfito sódico, la hidracina y la hidracina catalizada (Seo *et al.*, 2015).

Dado que la corrosión por oxígeno se produce por la acción del oxígeno disuelto en el agua, esta puede producirse también cuando la caldera se encuentra fuera de servicio e ingresa aire. La prevención de la corrosión por oxígeno se consigue mediante una adecuada degasificación del agua de alimentación y de mantener un exceso de secuestrantes de oxígeno en el agua de la caldera (Kumar, 2017).

- **Corrosión cáustica:** La corrosión cáustica se produce por una sobreconcentración local en zonas de elevadas cargas térmicas (horno y cámara trasera) de sales alcalinas como la soda cáustica. Este tipo de corrosión se manifiesta en forma de cavidades profundas, semejantes a la corrosión por oxígeno rellenas de óxidos de color negro, presentes solamente en las zonas de elevada liberación térmica (horno, placa y cámara traseras) de una caldera. La corrosión cáustica puede ser prevenida si se mantiene la alcalinidad, aniones hidroxilos libres y pH del agua de la caldera dentro de los límites recomendados (Bamkiewicz, 2012).

Corrosión en líneas de retorno de condensado

Las líneas de retorno de condensado, lógicamente no forman parte de una caldera, sin embargo, su corrosión tiene efectos sobre las calderas y puede ser prevenida con el tratamiento del agua. La corrosión de las líneas de retorno de condensado tiene efectos sobre una caldera, ya que, los óxidos (hematita) producidos son arrastrados a la caldera con el agua de alimentación. La corrosión en las líneas de retorno de condensado se produce por la acción del ácido carbónico que en estas se forma. La prevención de la corrosión en las líneas de retorno de condensado, puede

ser conseguida mediante aminos neutralizantes que neutralizan la acción del ácido carbónico y aminos fílmicas que protegen las líneas. Estas aminos son volátiles por lo que, al ser dosificadas a las líneas de alimentación de agua, son arrastradas por el vapor producido en la caldera (Chávez *et al.*, 2004; Nuñez, 2017).

Arrastre de condensado

Según Correa *et al.* (2008), el arrastre de condensado en una caldera tiene relación con el suministro de vapor húmedo (con gotas de agua). El suministro de vapor húmedo puede tener relación con deficiencias mecánicas y químicas. Las deficiencias mecánicas tienen relación con la operación con elevados niveles de agua, deficiencias de los separadores de gota, sobrecargas térmicas y variaciones bruscas en los consumos. Las deficiencias químicas tienen relación con el tratamiento de agua de la caldera, específicamente con excesivos contenidos de alcalinidad, sólidos totales (disueltos y en suspensión) y sílice, que favorecen la formación de espuma. Para prevenir el arrastre debido a deficiencias en el tratamiento de agua, se recomienda mantener los límites de los contenidos de alcalinidad, sólidos totales y sílice que se muestran en la tabla 1.1:

Tabla 1.1: Concentraciones límites permisibles en el agua para generación de vapor

Parámetros	Valor (ppm)
Alcalinidad total (CaCO ₃ (s))	< 700
Contenido de sílice (SiO ₂ (s))	< 150
Sólidos disueltos	< 3 500

Fuente: Correa *et al.*, (2008).

1.2 Métodos de tratamiento de agua para generación de vapor

En el siguiente subepígrafe se analizan los diversos métodos de tratamiento de agua necesarios para la generación de vapor, que contribuyen a evitar problemas en la estructura interna a los que están sujetas las calderas durante su operación continua.

1.2.1 Filtración y Ultrafiltración

El siguiente paso generalmente es atravesar algún tipo de filtración para eliminar cualquier partícula suspendida como sedimento, turbidez y ciertos tipos de materia orgánica. A menudo es útil hacer esto al principio del proceso, pues la eliminación de los sólidos suspendidos aguas arriba puede ayudar a proteger las membranas y las resinas de intercambio iónico de las

incrustaciones en el proceso de pretratamiento. Según el tipo de filtración utilizada, las partículas suspendidas pueden eliminarse hasta menos de una micra (Kyoung *et al.*, 2020).

1.2.2 Ablandamiento e intercambio iónico

El intercambio iónico es una operación de separación basada en la transferencia de materia fluido-sólido (Pérez *et al.*, 2006; Nevárez, 2009).

En el proceso de intercambio iónico ocurre una reacción química en la que los iones móviles hidratados de un sólido son intercambiados por iones de igual carga de un fluido (Choi, 2002). Este proceso consiste en pasar el fluido sobre un intercambiador catiónico y/o aniónico sólido, para reemplazar los cationes y/o aniones por el ion hidrónico ($H_{(ac)}^+$) y/o el anión hidroxilo ($OH_{(ac)}^-$) respectivamente (Manahan, 2007).

Las reacciones de intercambio iónico dependen de diversos factores:

- temperatura: los cambios bruscos de esta pueden provocar variaciones de las condiciones hidráulicas y en la cinética de las reacciones; si se producen, se deben efectuar ajustes de los flujos y a temperaturas bajas se pueden originar caídas de presión.
- la concentración de la especie en disolución: puesto que a una mayor concentración en la disolución de entrada se presentará una saturación más temprana, que a una concentración de disolución de entrada menor.
- naturaleza del ion: esto debido a que algunos intercambiadores de iones presentan una mayor selectividad hacia iones específicos.
- pH: este factor afectará la reacción de intercambio en dependencia del tipo de intercambiador; si es fuerte, operará a cualquier pH, pero si es débil, solo ocurrirá el intercambio con un pH específico (Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Chihuahua, 2009).

En el contexto de purificación, intercambio de ion es un proceso rápido y reversible en el cual los iones impuros presentes en el agua son reemplazados por iones que despiden una resina de intercambio de iones. Los iones impuros son tomados por la resina que debe ser regenerada periódicamente para restaurarla a su forma iónica original (Kyoung *et al.*, 2020).

1.2.3 Ósmosis inversa y nanofiltración

La ósmosis es el movimiento de moléculas a través de una membrana parcialmente permeable porosa, que va de una región de mayor potencial químico (menor concentración) a otra de menor

potencial (mayor concentración), en esta acción la membrana tiende a igualar las concentraciones en los dos lados. Este flujo de partículas disolventes hacia la zona de menor potencial se conoce como presión osmótica medible en términos de presión atmosférica. Si se utiliza una presión superior a la presión osmótica, un efecto contrario a la ósmosis se puede lograr, al presionar fluidos a través de la membrana y sólo las moléculas de menor peso pasan del otro lado (López, 2015; Andrade *et al.*, 2017).

En el tratamiento de agua los sólidos disueltos al generar esta presión quedan retenidos en la membrana y sólo pasa el agua, a esto se le llama ósmosis inversa (RO). Para lograr este efecto del paso del agua es necesario presurizar el agua a un valor superior al de la presión osmótica. (Garud *et al.*, 2011; Hasson, *et al.*, 2019).

El anexo 1 muestra el esquema del proceso industrial de la ósmosis inversa.

La nanofiltración (NF) es un proceso relacionado con la presión donde ocurre una separación basada en el tamaño molecular. Las membranas producen la separación. La técnica es principalmente aplicada para la eliminación de sustancias orgánicas como microcontaminantes e iones multivalentes (Wang *et al.*, 2020).

Procesos similares de separación, ambos fuerzan el agua a presión a través de membranas semipermeables, para atrapar contaminantes como bacterias, sales, compuestos orgánicos, sílice y dureza, mientras permiten el paso de agua concentrada y purificada (Boulahfa *et al.*, 2019).

1.2.4 Desaireación y desgasificación

En este punto del proceso de tratamiento del agua de alimentación de la caldera, cualquier condensado que se devuelva al sistema se mezclará con el agua tratada y entrará en el proceso de desaireación o desgasificación. La presencia de gases puede ser extremadamente corrosiva para los equipos y las tuberías de la caldera cuando se unen a ellos, pues forman óxidos. Por lo tanto, eliminar estos gases a niveles aceptables (casi el 100 %) puede ser imprescindible para la vida útil y la seguridad del sistema de caldera. Existen varios tipos de dispositivos de desaireación que vienen en una variedad de configuraciones según el fabricante, pero en general, puede usar un desaireador tipo bandeja o aerosol para la desgasificación o depuradores de oxígeno (Nuñez, 2017).

1.2.5 Coagulación y precipitación química

Después de que todos los objetos grandes se eliminan de la fuente de agua original, se agregan varios productos químicos a un tanque de reacción para eliminar los sólidos suspendidos y otros

diversos contaminantes. Este proceso comienza con una variedad de reactores de mezcla, típicamente uno o dos reactores que agregan químicos específicos para eliminar todas las partículas más finas del agua combinándolas en partículas más pesadas que se depositan. Los coagulados más utilizados son a base de aluminio, como el alumbre y el cloruro de polialuminio. A veces, un ligero ajuste de pH también ayudará a coagular las partículas (Nuñez, 2017).

1.3 Principios, generalidades y aplicaciones de la ósmosis inversa

Principio de funcionamiento

Para entender el proceso de la ósmosis inversa, se debe recordar la ósmosis natural, mecanismo de transferencia de nutrientes en las células de los seres vivos a través de las membranas que la recubren.

En tal sentido, cuando se ponen en contacto dos disoluciones de diferentes concentraciones de un determinado soluto (por ejemplo, sales), se genera un flujo de solvente (por ejemplo: agua) desde la solución más diluida a la más concentrada, hasta igualar las concentraciones de ambas.

Es decir, en otras palabras: si ponemos en contacto, a través de una membrana, agua salada y agua destilada obtendremos un equilibrio entre ambas y quedarán moderadamente saladas. El agua que atraviesa la membrana es empujada por la presión osmótica de la solución más salada y el equilibrio del proceso se alcanza cuando la columna hidrostática iguala dicha presión osmótica. Se deduce que si nuestro interés en el tratamiento es obtener una corriente de agua lo más diluida posible deberemos invertir el fenómeno. Para ello hay que vencer la presión osmótica natural mediante la aplicación en sentido contrario de una presión mayor (Lilane *et al.*, 2019).

Cuando se logra invertir el fenómeno, se denomina ósmosis inversa. En resumen: si a una corriente de agua salada se le aplica una fuerte presión, se logra obtener un equilibrio distinto del anteriormente descrito en el cual se generan simultáneamente dos corrientes: una que es la que atraviesa la membrana, queda libre de sólidos disueltos y de microorganismos: producto o permeado. La otra se concentra en esos mismos productos sin que lleguen a depositarse en la membrana, porque la cubrirían y se eliminarían en forma continua (Spellman, 2016).

La unidad de ósmosis inversa es capaz de eliminar cantidades sustanciales de productos químicos inorgánicos (como: sales, metales, minerales) y la mayoría de microorganismos, incluidas las *cryptosporidium* y giardia (Moreno, 2011).

En el anexo 2 se observa el esquema del fenómeno de ósmosis y de ósmosis inversa.

Generalidades

La ósmosis inversa ofrece la filtración más fina actualmente disponible, rechaza la mayoría de los sólidos disueltos y suspendidos, al tiempo que impiden el paso de las bacterias y los virus, para obtener un agua pura y esterilizada (Tong *et al.*, 2020).

Aguas con un elevado contenido de sales, minerales disueltos y metales como hierro, sodio, calcio, boro, cloruros, sulfatos, nitratos y bicarbonatos, aluminio, arsénico, bario, cadmio, cromo, cobre, flúor, magnesio, plomo, manganeso, mercurio, selenio, plata y zinc pueden ser tratados con la ósmosis inversa hasta alcanzar los límites considerados como aceptable para su utilización (Farah *et al.*, 2019; Yunhao *et al.*, 2020).

RO también es eficaz con el asbesto, muchos sabores, los productos químicos que producen olores y colores, partículas, los sólidos disueltos totales, turbiedad, y el radio (Mohammad *et al.*, 2019).

La separación de iones con ósmosis inversa es ayudada por las partículas cargadas. Esto significa que los iones disueltos que llevan una carga, como sales, son más propensos a ser rechazados por la membrana que los que no se cargan, como los orgánicos. Entre más grande es la carga y cuanto mayor sea la partícula, más será rechazada (García *et al.*, 2019).

Es por esto que la autora considera que el método que puede sustituir el tratamiento existente en la planta caso de estudio, con garantías de igualar o mejorar la calidad del agua tratada es precisamente la ósmosis inversa.

En la tabla 1.2 se presenta una comparación entre el intercambio iónico (tratamiento existente) y la ósmosis inversa (tratamiento propuesto).

Aplicaciones de la ósmosis inversa

RO tiene gran aplicación a nivel mundial debido a sus extensos beneficios y ventajas en el tratamiento de agua, tanto para su ablandamiento, la producción de agua potable o agua procesada y la obtención de aguas ultrapuras necesarias en las industrias electrónicas. (Moreno, 2011)

La ósmosis inversa tiene múltiples aplicaciones en la industria. A continuación, se presentarán las más importantes.

Tabla 1.2: Comparación entre el intercambio iónico y la ósmosis inversa

Tratamiento	Ventajas (Kucera, 2015)	Desventajas (Kavitha <i>et al.</i> , 2019)
Intercambio iónico	Muy buena calidad del agua producto	Proceso sucio, con efluentes alcalinos y ácidos
		Automatización compleja
		Tecnología no ecológica
		Tiempo perdido por regeneración de la resina
Ósmosis inversa	Bajo costo de producción	Las membranas son sensibles a daños
	Espacio reducido	Existe el riesgo de contaminación bacteriana de las membranas
	Fácil mantenimiento	Generación de corriente de alta concentración de sólidos disueltos
	Proceso limpio, sin efluentes alcalinos y ácidos	
	Automatización sencilla	
	Proceso eficiente y económico en una etapa para concentraciones entre 400 y 10 000 ppm	
	Muy rentable a largo plazo	

Fuente: Qasim *et al.*, (2019).

- Desalación de agua marina:

La ósmosis inversa se ha convertido en la tecnología más rentable económicamente, y, por tanto, la más utilizada para obtener grandes caudales de agua dulce a partir del agua del mar. Para ello hay que tener en cuenta que el agua de entrada presenta gran cantidad de sólidos disueltos, por lo que su presión osmótica es muy elevada. Esto hace que sea necesario aplicar grandes presiones para conseguir un flujo considerable de agua desalinizada a través de las membranas.

El agua marina se recoge mediante la construcción de un pozo playero o bien mediante captación directa del mar mediante una tubería. Esa agua se conduce a una estación de pretratamiento, vital para el buen funcionamiento de la planta. Este pretratamiento es personalizado para las características de cada planta, e incluye tantos procesos convencionales de clarificación (coagulación, floculación, filtración simple, decantación) como procesos de membrana (micro y ultrafiltración). A la salida del pretratamiento, el agua pasa a la planta de ósmosis inversa, donde se presuriza mediante bombas de alta presión para lograr una conversión del 40-60 % para agua del mar y hasta un 85 % para aguas salobres (Fernández, 2015)

- Reducción de la dureza del agua:

La tecnología de la ósmosis inversa también se utiliza para reducir las concentraciones de sales de magnesio y calcio, responsables de la dureza del agua. El funcionamiento es muy similar al de la desalinización de agua marina, pero puesto que en este caso hay una menor concentración de sólidos disueltos, las necesidades energéticas del bombeo en este caso serán menores.

La reducción de dureza del agua mediante este método presenta ventajas frente a otros métodos como pueden ser el intercambio iónico, ya que no precisa regeneración, elimina la mayoría de las sustancias orgánicas y biológicas y requiere menos espacio para su ubicación (Muelas, 2011).

- Concentración de zumos de frutas

La concentración de zumos de frutas consiste en la eliminación de agua para reducir el coste asociado a su transporte. Esta eliminación de agua puede llevarse a cabo industrialmente de numerosas formas. Las más utilizadas son la destilación a vacío, la ósmosis inversa y las técnicas criogénicas.

La ósmosis inversa presenta las ventajas de que, al no necesitar cambios de temperatura, el zumo no ve modificadas sus propiedades organolépticas ni se destruyen sus vitaminas. Además, para concentraciones del orden del 30-35 %, es el método que consume menos energía.

Su principal desventaja es que, a medida que el zumo se concentra, la presión osmótica crece exponencialmente, de forma que no es posible alcanzar concentraciones mayores del 35 %, lo que no ocurre en otras técnicas (mediante destilación al vacío se puede llegar a una concentración del 80 %).

Además, algunos compuestos de bajo peso molecular son capaces de pasar a través de las membranas, por lo que no sólo se retira agua de los zumos (Moreno, 2011).

- Fabricación de cerveza sin alcohol

La ósmosis inversa se utiliza ampliamente para la elaboración de cerveza sin alcohol. Para ello se combina con la destilación fraccionada: al introducir la cerveza en un módulo de ósmosis inversa, permea una mezcla de agua, alcohol y compuestos de bajo peso molecular. Esta mezcla se conduce a una columna de destilación, donde se retira el alcohol que sale en cabeza. La fracción de cola de la columna, formada por agua y compuestos de bajo peso molecular se retorna al rechazo del módulo de ósmosis inversa, donde se logra obtener cerveza libre de alcohol.

La desalcoholización de la cerveza mediante este método presenta las ventajas adicionales de que, al no necesitar el uso de calor, la cerveza no pierde sus propiedades, además, puesto que la cerveza se mantiene en todo momento bajo presión, no se descarbonata (Fernández, 2015).

1.4 La unidad de ósmosis inversa

En este subepígrafe se describirán distintas formas de agrupar los módulos de ósmosis inversa en una instalación.

1.4.1 Agrupación de módulos

Según Andrade y Hormaza (2016), para mejorar los rendimientos de una planta de ósmosis inversa, es muy común agrupar los módulos, tanto en serie como en paralelo.

- Módulos en serie: el permeado se recolecta en cada módulo y se conduce a un colector de permeado general. El rechazo del primer módulo se convierte en la alimentación del módulo siguiente, y así sucesivamente hasta llegar al rechazo general (ver anexo 3).
- Módulos en paralelo: en este caso, todos los módulos reciben la misma alimentación, que se reparte mediante un colector de aporte. El permeado de todos los módulos va al permeado general, mientras que el rechazo se canaliza mediante el rechazo general como se muestra en el anexo 4.

1.4.2 Agrupación de etapas

En primer lugar, hay que definir etapa como el conjunto de módulos que trabajan en paralelo, a la misma presión y alimentados desde una misma línea. Las etapas, como los módulos, pueden combinarse de diversas formas:

- Rechazo en serie: El rechazo de una etapa es la alimentación de la etapa siguiente, mientras que los permeados que se generan en cada etapa se canalizan separadamente. Es un sistema análogo a la agrupación de módulos en serie, como se observa en el anexo 5. Al instalar etapas en serie se consigue un mayor porcentaje de recuperación, como se puede observar en la tabla 1.3:

Tabla 1.3: Porcentaje de recuperación en dependencia del número de etapas en serie

Porcentaje de recuperación	Número de etapas en serie
50	1
75	2
87,5	3

Fuente: Delgado (2017).

De la tabla 1.3 se concluye que, si bien al aumentar el número de etapas también lo hace la recuperación, este aumento es menor cuantas más etapas tenga la instalación. Por este motivo no es común instalar más de tres etapas en serie, ya que la ganancia en porcentaje de recuperación no suele compensar al gasto que supone una etapa nueva (Delgado, 2017).

- Recirculación del rechazo: en este tipo de agrupación de etapas, los rechazos de los módulos no son llevados a una segunda etapa en línea, sino que se colectan en una tubería única, como se ve en el anexo 6. De esa tubería, parte se recircula para que se una con la alimentación, mientras que la otra parte se desecha como rechazo general. Los permeados se separan de la forma habitual. Con este procedimiento pueden alcanzarse conversiones de hasta el 75 %, es decir, concentraciones en el rechazo cuatro veces superiores a las de la alimentación (Muelas, 2011).

1.4.3 Agrupación de sistemas

Según Fernández (2015), un sistema es un conjunto de etapas agrupadas, pero con una única bomba de alta presión. Si se atiende a esta definición, las plantas de ósmosis inversa pueden organizarse de distintas formas según cómo agrupen sus sistemas:

- Sistemas en serie: Los sistemas se denominan pasos, y están conectados de forma análoga a los agrupamientos de etapas con rechazo en serie. En este caso es muy raro encontrar más de dos sistemas colocados en serie, debido al elevado precio de las bombas de alta presión, que hacen que el aumento en el porcentaje de recuperación no sea rentable.
- Sistemas en paralelo: Los sistemas se agrupan análogamente a la agrupación de módulos en paralelo, aunque como a la entrada de cada sistema se encuentra una bomba de alta presión, la alimentación puede no tener la misma presión en los dos sistemas. Como se puede observar en el anexo 7, dentro de cada sistema puede haber varias etapas, en este caso, que funciona en serie.

1.5 Tipos de membranas y características generales

Las membranas son un medio que separa dos fases y permite a su vez el paso de disolvente y algunos solutos, y no permite el paso de otros de un modo selectivo (Cabezas, 2013).

Las membranas filtrantes son la clave y responsables de separar las sales del agua, pueden considerarse como filtros moleculares. El tamaño de los poros de estos filtros membranas es extremadamente reducido, por lo que se requiere una presión considerable para hacer pasar cantidades de agua a través de ellas (Yahya *et al.*, 2017., Senán *et al.*, 2019).

Una membrana de ósmosis inversa en un equipo correctamente diseñado, la duración puede ser entre tres a cinco años. Es importante hacer los mantenimientos periódicos con químicos para

limpieza de membranas, según los consejos del fabricante (Garud *et al.*, 2011; Andrade *et al.*, 2017).

El anexo 8 muestra el esquema de una membrana de ósmosis inversa.

Las principales características que deben tener las membranas para obtener un producto de calidad (Sanz *et al.*, 2006; Da Silva *et al.*, 2018) son las siguientes:

- Poseer un alto nivel de rechazo de sales.
- Tener una alta permeabilidad.
- Ser estables en un amplio rango de pH, temperatura, y agentes químicos.
- Ser capaces de poder soportar las altas presiones que proporcionan las bombas de alta presión.

El desempeño de los sistemas de ósmosis inversa está caracterizado por dos parámetros: flujo de permeado y rechazo de sales. Este desempeño depende del material de la membrana (Peñate, 2010).

Los materiales más comunes en las membranas de ósmosis inversa son las del compuesto de película delgada de poliamida (TFC) y las de acetato de celulosa (CA). Las membranas de CA son utilizadas en unidades de agua potable para residencias, si el pH está dentro de los límites, así como en la industria farmacéutica, donde se realiza la inyección de cloro para mantener bajos conteos de bacterias. Las membranas TFC son las más utilizadas debido a sus altos porcentajes de rechazo y sus altas capacidades de flujo (Haleema *et al.*, 2020; Seyyed *et al.*, 2020). La tabla 1.4 muestra una comparación de las membranas TFC y CA.

Tabla 1.4 Comparación de membranas TFC y CA

Parámetros	CA	TFC
Temperatura máxima de operación	35 °C	45 °C
Turbidez máxima en la alimentación	≤ 1 UNT	≤ 1 UNT
Tolerancia al cloro libre	1ppm	0,1ppm
Rango de pH	5-5,6	2-11
Índice de ensuciamiento máximo	≤ 5 SDI	≤ 5 SDI

Fuente: Ibañez (2009).

Las membranas de poliamidas aromáticas presentan una mejor combinación de paso de solvente y rechazo de sales que las de acetato de celulosa. Por el contrario, las membranas de acetato de celulosa son más tolerantes al cloro libre (Liu *et al.*, 2019).

Principalmente debido a las mejores características de rechazo y a las menores presiones de trabajo, las membranas compuestas de película delgada son más usadas en las aplicaciones de

tratamiento de agua. La excepción son las aplicaciones con fuentes de agua ricas en orgánicos, para las cuales las membranas de acetato ofrecen significativos beneficios en términos de limitada bio-obstrucción de la membrana, limpieza y pretratamiento necesario (Gutiérrez *et al.*, 2019; Osman *et al.*, 2020). Para la realización de este trabajo, según criterio de la autora, se decide utilizar las membranas TFC, debido a sus características de rechazo que la hacen idónea para el proceso.

1.5.1 Configuración de membranas de ósmosis inversa

Según Zhang *et al.* (2019), Kiho *et al.* (2020), comercialmente se consideran cuatro configuraciones básicas utilizadas a lo largo de la historia de aplicación de la desalación mediante ósmosis inversa, pero sólo la última se utiliza actualmente:

- Plato y marco (ver anexo 9)
- Tubular (ver anexo 10)
- Fibra hueca (ver anexo 11)
- Arrollamiento en espiral (ver anexo 12)

En la tabla 1.5 se realiza una comparación entre las diversas configuraciones de las membranas.

Según la autora se decide utilizar como configuración, las membranas en espiral, pues según Da Silva *et al.*, (2018), son las más utilizadas a nivel mundial por su facilidad de limpieza y de reemplazo, su disponibilidad en una gran variedad de materiales y su buena resistencia a la contaminación por obstrucción.

Según Navarro y Ramos (2011) y Boulahfa *et al.* (2019), las membranas que se fabrican en la actualidad están normalizadas, con objeto no sólo de poder ser comparadas entre sí, en torno a unas condiciones de funcionamiento tipo, sino también poder sustituir unas por otras.

Esta normalización se basa fundamentalmente en el diámetro exterior de la membrana que suele ser de 100 o 200 mm. En cuanto a su longitud, las membranas espirales más comerciales suelen ser de un metro, aunque las de 200 mm se fabrican también de 1,5 m. Precisamente esta última longitud se introduce cada vez más con objeto de aumentar el caudal, ya que se aprovecha mejor el espacio disponible. Según Jungbin *et al.* (2019), respecto a las pruebas en que quedan caracterizadas varían según que las membranas sean de agua de mar o salobre, pero tienen en cuenta en ambos casos lo siguiente:

- La salinidad del agua de alimentación
- La temperatura del agua
- La presión de funcionamiento
- La recuperación por elemento

Tabla 1.5: Comparación entre los tipos de membranas

Características		Placas	Tubular	Espiral	Fibra hueca
Superficie de membrana por módulo (m ²)		15-50	1,5-7	30-34	370-575
Volumen de cada módulo (m ³)		0,30-0,40	0,03-0,1	0,03	0,04-0,08
Caudal por módulo (m ³ /d)		9-50	0,9-7	30-38	40-70
Grado de compactación de membrana (m ³ /m ²)		50-125	50-70	1 000-1 100	5 000-14 000
Productividad por unidad de superficie (m ³ /m ² d)		0,6-1	0,6-1	1-1,1	0,1-0,15
Productividad por unidad de volumen (m ³ /m ³ d)		30-125	30-70	1 000-1 250	900-1 500
Conversión de trabajo por módulo (%)		10	10	10-50	30-50
Intercambiabilidad por otra marca		Nula	Nula	Total	Nula
Tolerancia frente a las sustancias coloidales		Mala	Buena	Buena	Mala
Tolerancia frente a las sustancias en suspensión		Mala	Buena	Buena	Muy mala
Comportamiento frente a la limpieza	Mecánica	Regular	Bueno	No aplicable	No aplicable
	Química	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno
	Agua a presión	Excelente	Bueno	Bueno	Bueno
Pretratamiento necesario		Coagulación +Filtración a 5 micras	Filtración	Coagulación +Filtración a 5 micras	Coagulación +Filtración a 1 micra
Aplicaciones		Alimentación	Alimentación	Desalación de aguas salobres y de mar	Desalación de aguas salobres y de mar
		Líquidos pocos cargados	Aguas residuales y líquidos cargados	Obtención de agua de alta pureza	Obtención de agua de alta pureza
		Concentración y recuperación de sustancias	Concentración y recuperación de sustancias	Aguas residuales y líquidos poco cargados	Concentración y recuperación de sustancias
Costo relativo de fabricación		Alto	Alto	Moderado	Bajo

Fuente: DSS S.A. (2017)

1.5.2 Área activa de la membrana

Según Muelas (2011), el área activa de una membrana de ósmosis inversa es la superficie a través de la cual se produce el paso del flujo de permeado, que va desde el compartimento de alta presión al de baja presión. Conocer el área activa exacta de una membrana es de gran importancia, razón por la cual los fabricantes de elementos para ósmosis inversa incluyen su área activa en las especificaciones de la membrana.

1.5.3 Clasificación de membranas según su presión de trabajo:

La presión de trabajo es una característica muy importante en una membrana y puede indicar a que fin está dedicada. Normalmente, cuanto mayor cantidad de sales tiene la alimentación, es necesario utilizar módulos con una mayor presión de trabajo.

- Membranas de muy baja presión: emplean presiones de entre cinco y diez bares, y se utilizan para desalar aguas de baja salinidad y fabricar agua ultrapura.
- Membranas de baja presión: utilizan presiones de entre 1 000 y 2 000 kPa, y se suelen usar para desalar aguas de salinidad media.
- Membranas de media presión: su rango de trabajo está comprendido entre 2 000 y 4 000 kPa, se utilizan para numerosas aplicaciones, son las más utilizadas a nivel mundial en desalinización de aguas para uso industrial.
- Membranas de alta presión: su principal aplicación es la desalación de agua del mar para obtener agua potable. Emplean presiones de entre 5 000 y 8 000 kPa (Fernández, 2015).

La autora determina que en esta investigación se utilizarán membranas de media presión debido a que son consideradas idóneas en desalar aguas para uso industrial.

1.6 Dow Chemical

Entre los fabricantes de membranas se encuentran las empresas *Toray*, *Hydranautics*, *Fluid Systems* y *Dow Water & Process Solutions Business* (Spellman, 2016).

The Dow Chemical Company es una de las mayores compañías químicas del mundo. Tiene su central ubicada en Midland, Michigan (Estados Unidos), y es una corporación multinacional que cuenta con 50 000 empleados repartidos en 188 plantas situadas en 35 países.

Dow combina la producción industrial a gran escala con la investigación en nuevos productos y materiales. De hecho, su presupuesto en investigación y desarrollo excede el billón de dólares anuales.

La *Dow Chemical* posee una empresa subsidiaria llamada *Filmtec Corporation* dedicada a la producción de elementos e instalaciones de purificación de agua, principalmente membranas de ósmosis inversa y de nanofiltración, denominadas comercialmente membranas *Filmtec*TM. Esta compañía subsidiaria forma parte del ramal llamado *Dow Water & Process Solutions Business*, dedicado a la investigación y puesta en marcha de instalaciones para la purificación de agua para el uso humano, especialmente en países como Emiratos Árabes Unidos o Arabia Saudí. La investigación en purificación de agua se centra tanto en la ósmosis inversa como en el intercambio iónico (Muelas, 2011).

Filmtec utiliza diversas nomenclaturas para diferenciar los modelos de membranas.

Las primeras letras indican el tipo de membrana de acuerdo a su uso, según el siguiente código:

- TW: *Tap Water* (agua del grifo)
- BW: *Brackish Water* (agua salobre)
- SW: *Seawater* (agua del mar)
- SWHR: *Seawater High Rejection* (agua del mar con elevado rechazo de sales)

A continuación, se indica mediante dos números la familia de elementos a los que pertenece la membrana en cuestión. Por ejemplo: 30, si pertenece a la familia BW30.

La tercera parte corresponde al diámetro del elemento (multiplicado por 10, en pulgadas). Por ejemplo, si presenta un diámetro de 4", este código sería 40.

La cuarta y última parte corresponde a la longitud del elemento, en pulgadas. Por ejemplo, si presenta una longitud de 40", este código sería 40 (Spellman, 2016).

Según la autora se decide utilizar membranas de la firma *Filmtec* pues según Lara (2008), *Dow Filmtec* es el líder mundial reconocido en soluciones tecnológicas para el tratamiento de aguas industriales, municipales, comerciales y residenciales. Además, es uno de los mayores fabricantes de membranas de ósmosis inversa en el mundo. Dichas membranas proporcionan excelente estabilidad estructural, un alto nivel de rechazos de sólidos y sustancias orgánicas disueltas y ofrecen mayor productividad que membranas de ósmosis inversa de otras marcas.

Según González (2010), la elección del modelo de membrana de la firma *Filmtec* depende de la cantidad de sólidos totales disueltos (TDS) del agua de alimentación, define que para aguas con un conjunto de TDS entre 1 000 y 10 000 mg/L se le atribuye el modelo BW30, el agua de alimentación para el tratamiento en la PPC presenta un valor máximo de TDS de 3 500 mg/L, por

lo tanto, le corresponde dicho modelo. La tabla 1.6 muestra los modelos de membranas más usados para la generación de vapor.

Tabla 1.6 Modelos de membranas Filmtec BW30

Tipo de Membrana	Temperatura máx de operación (°C)	Presión máx de operación (bar)	Área activa (m ²)	Flujo de permeado (m ³ /d)	Rechazo de sales (%)
BW30-400	45	41	37	40	99,5
BW30-365	45	41	34	36	99
BW30-4040	45	41	7,2	9,1	99,5
BW30-2540	45	41	2,6	3,2	99,5
BW30-400/34i	45	41	37	40	99
BW30HR-440i	45	41	41	48	99,4
BW30HR-440	45	41	41	48	99,4
BW30-400/34	45	41	37	40	99
BW30XFR-400/34	45	41	37	43	99,4
BW30HRLE-440	45	41	41	48	99,1
BW30HRLE-440i	45	41	41	48	99,1
BW30XFRLE-400/34	45	41	37	43	99,1

Fuente: *Filmtec membrane datasheets*, (2020)

1.7 El programa ROSA

El programa ROSA es un software desarrollado por *Dow Chemical* para el cálculo de instalaciones industriales de ósmosis inversa. ROSA son las siglas de *Reverse Osmosis System Analysis* (Sistema de Análisis de Ósmosis Inversa), y se trata de una herramienta asistida por ordenador para el diseño y operación de sistemas de ósmosis inversa y nanofiltración para el tratamiento y purificación de aguas (Muelas, 2011).

Para la realización de este trabajo, la autora utilizará este programa para el dimensionamiento del equipo.

1.8 Conclusiones parciales del capítulo

1. El tratamiento del agua de un generador de vapor es fundamental para asegurar una larga vida útil libre de problemas operacionales y de accidentes.
2. Los principales problemas causados por las impurezas en el agua de alimentación son las incrustaciones, corrosión y el arrastre de partículas sólidas y líquidas.
3. El proceso de ósmosis inversa garantiza la eliminación de bacterias, sales, compuestos orgánicos, sílice y dureza, mientras permiten el paso de agua purificada.
4. Las membranas fabricadas de poliamidas aromáticas, con configuración de arrollamiento

en espiral y membranas de media presión son las más adecuadas para el proceso de tratamiento de aguas.

5. Entre los fabricantes de membranas, el más indicado para el tratamiento de agua para la generación de vapor es *Dow Water Solutions*, debido a la combinación de los elementos de ósmosis inversa de resistencia extrema al ensuciamiento y el bajo consumo energético.
6. El modelo de membrana más recomendado para el tratamiento de aguas industriales es *Filmtec BW-30*.

Capítulo 2: Materiales y Métodos

El presente capítulo tiene por objeto comprender los cálculos que realiza internamente el programa ROSA de *Dow Water Solutions Company* para lo cual se va a proceder a desarrollar el dimensionamiento de la unidad de ósmosis inversa.

2.1 Descripción del Caso de Estudio

Se toma como caso de estudio la Planta de Tratamiento de Aguas de alimentación a los generadores de vapor.

El agua cruda procedente de los pozos profundos es bombeada hacia el tanque de recepción de 70 m³ de capacidad con tres bombas de profundidad, de aquí se bombea con dos Bombas Grundfos (un repuesto) de agua cruda hacia los suavizadores donde entra por la parte superior y atraviesa la capa de resina catiónica para intercambiar iones calcio y magnesio del agua cruda por iones sodio de la resina para eliminar su dureza. El suavizamiento de agua está basado en el principio químico de intercambio de iones.

El agua entra a los suavizadores con la dureza del agua cruda máxima 300 mg/L y sale por la parte inferior con dureza total 0-4 mg/L hacia el tanque de agua tratada de 400 m³ de capacidad. De este tanque se bombea automáticamente con dos bombas una CRN-64-2-1 y otra bomba Gould hacia el desaireador de donde se alimenta a las calderas (del colector de succión de las bombas va adosada una tubería de 6" de diámetro nominal que se interconecta con la succión de las bombas de agua de alimentación de cada caldera. Al desaireador también se bombea de forma automática condensado con dos bombas grundfos, después de pasar por un tanque Flasheo. Este condensado es recuperado del tanque seis y de los intercambiadores de la Segunda Etapa de Separación (SES) y la Estación Cabecera Oleoducto (ECO). En la succión de cada bomba se añade el producto de tratamiento interno del agua de calderas.

En el proceso de suavizamiento del agua la resina intercambiadora se agota y deja de captar los iones calcio y magnesio, por lo que es necesaria su regeneración, esta consta de cuatro pasos:

- **Contralavado:** Se realiza en contracorriente de abajo hacia arriba con el objetivo de expandir la resina y eliminar suciedades que hayan sido atrapadas. Este está regulado de forma que no se pierda resina. Se realiza hasta que el agua salga totalmente limpia.
- **Inyección de la Salmuera:** Se hace con el objetivo de reponer propiedades de intercambio de la resina con una solución de salmuera del 8-15 % que es extraída por un

eductores de la piscina donde se encuentra preparada al 26 %. Esto se efectúa en un tiempo entre 45 y 60 minutos que es el tiempo óptimo.

- **Desplazamiento:** Se hace con el objetivo de desplazar toda la salmuera del interior del suavizador. Este se detiene cuando se elimina el sabor salino y cuando los cloruros son iguales a los del agua cruda.
- **Enjuague:** Se hace con el objetivo de eliminar residuos de dureza y cloruros. Se realiza hasta que por análisis la dureza total sea cero y el contenido de cloruros sea igual al del agua cruda. Esta operación se realiza cada vez que se vaya a poner en servicio un suavizador después de una parada larga o regeneración.

Posteriormente al proceso de suavizamiento el agua pasa por el desgasificador térmico de tipo cascada. El caudal de agua a tratar será de 40 m³/h, tras calcular una temperatura en el agua de alimentar de 20 °C para la totalidad del agua. La presión de funcionamiento normal de este desgasificador estará comprendida sobre los 20 kPa efectivos (manométricos) para así garantizar una temperatura del agua de aproximadamente 105 °C.

El desgasificador se diseña para recibir indistintamente agua de aporte tratada a 20 °C de temperatura y aguas procedentes de condensados a 95 °C con dos grupos independientes de regulación de entrada, que recibirá la señal de un sólo controlador de nivel (Transmisor presión diferencial). El agua desgasificada se almacena en el depósito situado debajo del desgasificador a una temperatura comprendida entre 100 y 103 °C y desde allí se enviará mediante grupos de motobombas a los generadores de vapor. Esta agua de alimentación a las calderas contiene productos químicos que se añaden en la línea de succión de cada caldera, mediante bombas de dosificación (CUPET, 2017).

El anexo 13 muestra el diagrama de la Planta de Procesamiento de Crudo.

2.2 Metodología que utiliza el software ROSA de *Dow Water Solutions Company* para el dimensionamiento de la unidad de ósmosis inversa

2.2.1 Variables de interés en ROSA

En este apartado se explicarán las principales variables y parámetros que afectan al funcionamiento de un sistema de ósmosis inversa, y particularmente, a todos aquellos que se utilizan en el programa ROSA.

Presión, Temperatura y Flujos

La presión, la temperatura y los distintos tipos de flujos son variables de gran importancia en el funcionamiento de un sistema de ósmosis inversa, y por tanto es necesario controlarlos y optimizarlos lo mejor posible.

En ROSA se utilizan como parámetros tres tipos de presiones distintas: la presión de alimentación (*feed pressure*), la contrapresión (*back pressure*), y la presión de impulso (*boost pressure*). De igual modo, en una instalación de ósmosis inversa se pueden encontrar distintos tipos de flujos. En cambio, la temperatura de operación es única, ya que será igual en toda la instalación.

- **Presión de la alimentación**

La presión que se comunique a la corriente de alimentación es la que permite el paso a través de la membrana de las moléculas de disolvente desde el medio hipertónico al hipotónico. La verdadera fuerza motriz no sólo depende de la presión de alimentación, sino que resulta de la diferencia de presiones a ambos lados de la membrana, junto con la diferencia de presiones osmóticas.

Si se mantienen constantes el resto de las variables de la instalación, un aumento de la presión en la alimentación provocará un aumento del caudal de permeado, que además poseerá una menor concentración de sales (pues al aumentar el flujo con el mismo paso de sales, el resultado aparente será el de una dilución del permeado). Si se disminuye la presión en la alimentación, el efecto observado será el contrario: menor caudal de permeado, que además poseerá una mayor concentración de sales.

Sin embargo, hay que tener cuidado a la hora de aumentar la presión de alimentación, ya que la presurización de esta corriente constituye un gran gasto energético, por tanto, económico. Dicha presión deberá ser exactamente la necesaria para alcanzar los requisitos establecidos en el diseño.

Además, siempre hay que tener en cuenta el efecto de las demás variables: temperatura, parámetros del agua, parámetros de la membrana, ligeros cambios en estas variables pueden producir grandes variaciones en la presión que se tiene que suministrar a la alimentación para lograr el caudal de permeado deseado. De esto se deduce la gran dificultad de realizar un cálculo fiable y realista de la presión necesaria en la corriente de alimentación.

Debido a la gran importancia de esta variable, una forma de calcular una instalación mediante ROSA es que se pida al usuario todos parámetros necesarios para su cálculo: se caracteriza completamente el agua de alimentación, la temperatura del sistema, el tipo de membrana que posee cada etapa, se fija el caudal de entrada y el caudal de permeado y con todos estos datos, el programa calculará la presión que hay que suministrar a la alimentación en esas condiciones especificadas para lograr los objetivos de diseño establecidos. Sin embargo, la presión de alimentación también puede ser una variable fijada: en ese caso, lo que calculará el programa serán los flujos que se consiguen mediante esa presurización en la instalación descrita.

- **Contrapresión**

La contrapresión, presión trasera o *back pressure* se refiere a la presión a la que se encuentra el flujo de permeado en una etapa de ósmosis inversa. Así pues, antes de su paso por la membrana (cuando se encuentra en el compartimento de alta presión) el agua presentará la llamada presión de alimentación o *feed pressure*. Sin embargo, tras atravesar la membrana, el agua se encontrará en el denominado compartimento de baja presión, donde su presión habrá caído hasta la llamada contrapresión o *back pressure*.

La fuerza impulsora que permite el paso del agua a través de la membrana semipermeable es la diferencia de presiones existente entre la presión de alimentación y la contrapresión, junto con la diferencia de presiones osmóticas entre ambos compartimentos. A esta fuerza impulsora se le denomina NDP: *Net Driving Pressure*.

Al igual que interesan presiones de alimentación altas, parece lógico que se busquen contrapresiones bajas, pero esto no siempre es así, ya que, si la instalación presenta varios pasos en serie, lo normal (excepto si se introduce una bomba entre ellos) es que la contrapresión de un paso sea la presión de alimentación del siguiente.

- **Presión de impulso**

La presión de impulso o *boost pressure* se refiere a un aumento de presión que se lleva a cabo en un punto de la instalación mediante la instalación de una bomba. Realmente, equivale a una presión de alimentación para la etapa inmediatamente posterior a la bomba, pero ROSA hace una distinción de nombres en función de en qué parte de la instalación se coloque la bomba: si se coloca antes de la entrada a un paso, esa presión se denomina *feed pressure* (presión de

alimentación), sin embargo, si la bomba se coloca entre etapas dentro de un mismo paso, esa presión pasa a denominarse *boost pressure* (presión de impulso).

- **Temperatura**

La temperatura que poseen las corrientes de la instalación también es una variable de gran importancia en los sistemas de ósmosis inversa. La temperatura afecta tanto a la presión osmótica como a la permeabilidad del agua a través de la membrana: normalmente se acepta que el flujo de permeado se incrementa alrededor de un 3 % por cada °C de incremento de temperatura. Sin embargo, el paso de sales también aumenta con la temperatura a la misma tasa que el flujo, por lo que al incrementarse la temperatura a flujo de permeado constante, la calidad del permeado disminuye. También hay que tener en cuenta los efectos que la temperatura tiene sobre la calidad de las membranas: elevadas temperaturas pueden disminuir el rendimiento de éstas de forma irreversible.

El programa ROSA siempre pedirá al usuario la temperatura a la que se encuentra la corriente de alimentación, y en caso de que no sea fija, pedirá las temperaturas máximas y mínimas.

A efectos del cálculo de la instalación, en ROSA la temperatura siempre será una variable fijada por el usuario, a diferencia de las presiones o los caudales, que pueden considerarse como variables que el programa debe calcular para lograr los objetivos de diseño marcados.

- **Flujos**

En ROSA hay dos tipos diferentes de flujos:

1. Caudales (*Flow*): son los más utilizados, e indican volumen por unidad de tiempo (en las unidades seleccionadas en este manual, m³/h). Dentro de estos caudales se encuentran variables de gran importancia en una instalación de ósmosis inversa:
 - *System Feed Flow*, que indica el caudal total de agua de alimentación que entra al sistema.
 - *Feed Flow*, indica el caudal de agua que entra al paso seleccionado en ese momento.
 - *System Permeate Flow*, que indica el caudal total de permeado que sale del sistema.
 - *Permeate Flow*, que indica el caudal de permeado que sale del paso seleccionado en ese momento.

Estos cuatro caudales son los de mayor importancia en ROSA

Los caudales de la instalación pueden ser fijados por el usuario, en cuyo caso ROSA calculará las presiones necesarias para que en la instalación descrita se produzcan dichos flujos. La otra opción consiste en fijar las presiones, de forma que ROSA calcule los flujos resultantes.

2. Flujo específico (*Flux*): este tipo de flujo es menos utilizado que los caudales, e indica volumen por unidad de tiempo y unidad de sección (en las unidades utilizadas en el manual, l/m²h). En ocasiones también se le denomina *Average Flux*, flujo específico medio (Muelas, 2011).

Como puede deducirse de sus unidades, el flujo específico indica el caudal que permea por unidad de área activa de la membrana. Este parámetro será de interés a la hora de decidir la idoneidad de una membrana, pero siempre aparecerá como una variable dependiente: no se puede fijar, y su valor siempre lo darán los cálculos del programa.

2.2.2 Análisis del agua de alimentación

Las características físicas y químicas del agua que se va a tratar constituyen la base de partida para el diseño de la planta de desalación. El análisis iónico es por tanto imprescindible, pues no sólo nos sitúa en cuanto a salinidad dentro del rango de membranas que van a poder utilizarse, sino que además nos va a mostrar las limitaciones que en cualquier caso se van a presentar respecto a la conversión del sistema. El análisis iónico debe ser lo más completo posible con especial referencia a los iones que presentan más dificultades para su separación.

Los análisis para la caracterización físico-química del agua se realizan a través del Manual de Procedimientos Analíticos para Aguas y Efluentes (*Alpha*), los procedimientos para cada análisis se pueden encontrar en el anexo 14.

La composición iónica del agua a tratar en la PPC debe recogerse en la tabla 2.1:

Tabla 2.1 Características del agua de alimentación

Parámetros	Valores	Unidad
pH		-
Temperatura		°C
Ca ²⁺		mg/L
Mg ²⁺		mg/L
K ⁺		mg/L
Na ⁺		mg/L
Cl ⁻		mg/L
NO ₃ ⁻		mg/L
SO ₄ ²⁻		mg/L
Turbidez		NTU
Conductividad		mS/cm

Según Muelas (2011), para caracterizar el agua de alimentación, en ROSA se utilizan diversos parámetros, especialmente en las pestañas principales. Esos parámetros de calidad del agua se explican a continuación:

Silt Density Index (SDI): es un parámetro que indica el grado de presencia de partículas coloidales en el agua a tratar. Es de gran importancia en ROSA, ya que las partículas coloidales son responsables de ensuciamientos y obstrucciones en las membranas, donde provoca una disminución de su rendimiento.

El SDI se determina mediante un procedimiento estandarizado y reproducible, ampliamente aceptado en la industria. Con este procedimiento se estima el grado de ensuciamiento de las membranas debido a la contaminación por partículas coloidales presentes en el agua de alimentación. El procedimiento consiste en un ensayo, en el que se observa la disminución del flujo a través de un filtro debido al ensuciamiento del mismo, a una presión de la alimentación constante de 206,8 kPa (30 psi). El aparato para medir el SDI se muestra en el anexo 15, y consiste en un regulador de presión y un portafiltros, en el que se coloca un filtro estandarizado con un tamaño de 0,45 µm de poro, suficiente para ser obstruido por materia coloidal pero no por arena o incrustantes.

El ensayo estándar consta de tres partes:

1. En la primera, se coloca el filtro limpio en el portafiltros, y se mide el tiempo que tarda en filtrarse 500 mL del agua objeto de estudio, a una presión de 20,68 kPa. Ese tiempo se denominará t_1 .
2. Tras medir t_1 , se deja correr el agua objeto de estudio a través del filtro durante 15 minutos.
3. Pasados 15 minutos, se determina nuevamente el tiempo que tarda en filtrarse 500 mL del agua que de estudio. Este tiempo se denomina t_2 .

Una vez se ha realizado el ensayo, se calcula el SDI mediante la siguiente fórmula 2.1:

$$SDI = 100 \cdot \frac{1 - \frac{t_1}{t_2}}{T} \quad 2.1$$

Donde:

t_1 : es el tiempo necesario para filtrar 500 mL de muestra, al inicio de la prueba

t_2 : es el tiempo necesario para filtrar 500 mL de muestra, al final de la prueba

T: es el tiempo entre mediciones (15 minutos)

Valores de SDI altos indicarán una alimentación con gran cantidad de sustancias coloidales, por lo que interesarán bajos valores de SDI.

pH: indica la concentración de iones hidronio presentes en una disolución acuosa y se define como se muestra en la ecuación 2.2:

$$pH = -\log_{10} (a_{H_3O^+}) \quad 2.2$$

Donde:

$a_{H_3O^+}$: actividad del ion hidronio

El pH es de gran importancia en un sistema de ósmosis inversa, pues puede afectar la calidad y vida útil de la membrana. El valor del pH condiciona la formación o desaparición de especies que resultarían perjudiciales para el proceso, como puede ser el $CaCO_{3(s)}$.

TDS: el *Total Dissolved Solids* (TDS), en español SDT (Sólidos Disueltos Totales) es un parámetro que indica la concentración (en mg/L) de todos los sólidos que se encuentren disueltos en el agua. El cálculo de TDS se encuentran en el acápite 2.2.8.

LSI: El *Langelier Saturation Index* (LSI) indica el grado de saturación del agua con respecto al carbonato de calcio, correlacionándolo con el pH como variable principal.

- A pH bajo, los carbonatos e hidrogenocarbonatos pasarán a ácido carbónico, por lo que no habrá riesgo de deposiciones ni precipitaciones de $CaCO_{3(s)}$. En cambio, la elevada concentración de $H_2CO_{3(ac)}$ provocará que el agua presente características corrosivas.
- Por el contrario, a pH elevados, habrá gran concentración de CO_3^{2-} , y muy poco ácido carbónico, por lo que el agua no tendrá propiedades corrosivas. No obstante, los carbonatos tenderán a combinarse con los Ca^{2+} para formar $CaCO_{3(s)}$. Este carbonato cálcico podría llegar a precipitar al alcanzar una concentración dada, donde provoca deposiciones y le otorga al agua lo que se conoce como condiciones incrustantes. La forma de calcular el LSI se muestra en la ecuación 2.3:

$$LSI = pH - pH_s \quad 2.3$$

Donde:

pH: pH medido en el agua

pH_s: pH de saturación en CaCO₃, que se calcula mediante la fórmula 2.4:

$$pH_s = (9,3 + A + B) - (C + D) \quad 2.4$$

Donde los coeficientes A, B, C y D se calculan a través de las ecuaciones 2.5, 2.6, 2.7 y 2.8 respectivamente:

$$A = \frac{(\log_{10}[TDS]-1)}{10} \quad 2.5$$

$$B = -13,12 \cdot \log_{10}[T(K)] + 34,55 \quad 2.6$$

$$C = \log_{10}[Ca^{2+} \text{ en forma de } CaCO_3] - 0,4 \quad 2.7$$

$$D = \log_{10}[\text{alcalinidad total carbonatada}] \quad 2.8$$

Todos los parámetros que se encuentran entre corchetes corresponden a concentraciones, medidas en ppm. La alcalinidad total carbonatada se refiere a la concentración (mg/L) de carbonatos que se encuentran libres, de forma que actúan como bases, y alcalinizan el agua.

- Un agua con un LSI de cero corresponderá a un agua en condiciones óptimas de estabilidad: ni corrosiva ni incrustante.
- Un agua con un LSI positivo corresponderá a un agua con propiedades incrustantes, en la que se darán precipitaciones y deposiciones de carbonato cálcico.
- Un agua con un LSI negativo corresponderá a un agua con propiedades corrosivas.

2.2.3 Características y calidad deseadas del agua producto

El reglamento tecnológico de la Planta de Procesamiento de Crudos (CUPET, 2017) establece los siguientes criterios de calidad del agua a utilizar en los generadores de vapor (Tabla 2.2).

Tabla 2.2 Criterios de calidad del agua

Parámetros	Unidad de medida	Valor mínimo	Valor máximo
pH en agua de calderas	-	10,5	12
Dureza total en agua de calderas	mg/L	0	4
Cloruros en agua de calderas	mg/L	-	1 600
Conductividad en calderas	mS/cm	-	6
Sólidos Totales Disueltos por calderas	mg/L	-	3 500
Alcalinidad total en agua de alimentación	mg/L	-	Agua cruda
Fosfatos en agua de caldera	mg/L	5	20

2.2.4 Selección de la membrana

Ibañez (2009) plantea que la membrana a seleccionar debe poseer una alta permeabilidad y selectividad, una resistencia mecánica adecuada, buena estabilidad química y térmica en las condiciones de trabajo, baja velocidad de obstrucción y un largo y confiable funcionamiento. Se deben tomar en cuenta varios elementos como: la naturaleza del líquido del proceso. Además, se indica que el porcentaje recomendado máximo de recuperación por elemento es del 15 %, ya que porcentajes mayores conducirán a rápidos ensuciamientos de las membranas de la instalación. Asimismo, a la hora de diseñar los caudales, hay que tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Si se instalan elementos de 61 mm (2,5”) de diámetro, el caudal máximo de permeado será de 2,6 m³/día, y el caudal mínimo de concentrado, de 0,2 m³/h.
- Si se instalan elementos de 99 mm (4”) de diámetro, el caudal máximo de permeado será de 6,8 m³/día, y el caudal mínimo de concentrado, de 0,7 m³/h.

Así pues, a la hora de diseñar las configuraciones del sistema, el usuario deberá fijarse que estos parámetros no se alejen mucho de los recomendados.

Al momento de seleccionar la membrana, ROSA fija además los siguientes criterios para el agua de alimentación:

- Si los TDS del agua presentan valores inferiores a 1 000 mg/L se pueden utilizar membranas NF270, NF90, XLE, LE, LP, TW30, BW30.
- Si los mg/L de TDS se encuentran en el rango de 1 000 y 10 000, se utilizan membranas BW30.
- Si los mg/L de TDS se encuentran en el rango de 10 000 y 30 000, le corresponden membranas SW30XLE, SW30ULE.
- Si los TDS del agua presentan valores en el rango de 30 000 mg/L y 50 000 mg/L, pueden utilizarse membranas SW30HR, SW30XHR, SW30HRLE, SW30XLE.

2.2.5 Balance de materia inicial

Según Ibañez (2009), de forma general se tiene que (ecuaciones 2.9 y 2.10):

$$Q_F = Q_P + Q_R \quad 2.9$$

$$Q_F = \frac{Q_P}{\eta} \quad 2.10$$

Donde:

Q_F : caudal de alimentación, m³/día

Q_P : caudal de permeado o caudal agua producto, m³/día

Q_R : caudal de rechazo o salmuera, $m^3/día$

η : rendimiento global (%)

En la figura 2.1 se puede observar el diagrama de bloque de la unidad de ósmosis inversa:

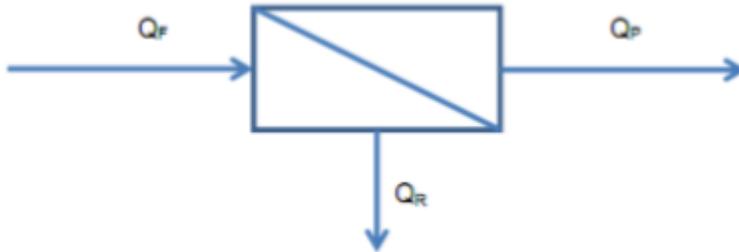


Figura 2.1 Diagrama de bloque de la unidad de ósmosis inversa

2.2.6 Porcentaje de Rechazo de Sales

Muelas (2011) plantea que el porcentaje de rechazo de sales o *Rejection*, en ROSA, es un parámetro de gran importancia a la hora de evaluar una membrana, ya que indica la calidad con la que separa el agua de las sales disueltas.

Realmente, una membrana de ósmosis inversa nunca es capaz de eliminar por completo las sales disueltas, sino que el permeado siempre tendrá una pequeña concentración de éstas. El parámetro *Rejection* da una medida de cómo de eficaz es una membrana a la hora de impedir el paso de los sólidos disueltos, ya que indica el porcentaje de sales que son rechazadas en su paso a través de la membrana.

En la ecuación 2.11 se muestra la definición del porcentaje de rechazo:

$$\%Rechazo = \frac{Conc_f - Conc_p}{Conc_f} \cdot 100 \quad 2.11$$

Donde:

$Conc_p$: la concentración de la sal genérica M_aX_b en el permeado, es decir: $[M_aX_b]_{permeado}$

$Conc_f$: la concentración de la sal genérica M_aX_b en la alimentación multiplicada por un factor que depende del porcentaje de recuperación de la membrana, tal y como se muestra en la fórmula 2.12:

$$Conc_f = [M_aX_b]_{alimentación} \cdot \frac{\ln\left(\frac{1}{1-Rec}\right)}{Rec} \quad 2.12$$

Donde Rec , es el porcentaje de recuperación o *Recovery* de la membrana definido en el apartado 2.2.7.

A pesar de que el agua de alimentación real que hay que tratar en una planta de ósmosis inversa posee gran cantidad de iones disueltos, gases y sustancias coloidales en suspensión, el cálculo del porcentaje de rechazo de sales para una membrana determinada se realiza mediante la utilización de una disolución de una única sal (en las fórmulas anteriores presentada como M_aX_b) en agua. Esta sal suele ser el cloruro de sodio, ya que está demostrado que las membranas de ósmosis inversa rechazan peor los iones monovalentes como el Na^+ y el Cl^- que los divalentes. En todo caso, el fabricante debe siempre especificar qué compuesto ha utilizado para el cálculo del porcentaje de rechazo de sales, así como la concentración del agua utilizada como alimentación.

2.2.7 Porcentaje de recuperación

El porcentaje de recuperación o *Recovery* de un elemento, etapa, paso o sistema de ósmosis inversa se muestra en la ecuación 2.13:

$$Recovery = 100 \cdot \frac{Q_P}{Q_F} \quad 2.13$$

Según el porcentaje de recuperación que se trate, estos caudales serán diferentes. Por ejemplo, para calcular el *Recovery* de un paso, el Q_P será el caudal de permeado total que salga de dicho paso, mientras que el Q_F corresponderá a la alimentación total que entra al paso en cuestión.

Así pues, el *Recovery* indicará el porcentaje de caudal de alimentación que permea a través de la membrana (o membranas) del sistema escogido. Este parámetro puede referirse al sistema global *System Recovery* o a un paso, etapa o elemento en concreto, en cuyo caso simplemente se denominará *Recovery* (Muelas, 2011).

2.2.8 Cálculo de los sólidos totales disueltos (TDS)

Una vez conocidos los flujos volumétricos de todas las corrientes y las concentraciones de los distintos iones en la corriente de alimentación, se calculan las concentraciones de estos mismos iones en las corrientes del permeado y del rechazo. Para ello se resuelve el balance de materia mostrado en la ecuación 2.14:

$$Q_F \cdot C_{Fi} = Q_P \cdot C_{Pi} + Q_R \cdot C_{Ri} \quad 2.14$$

Al despejar la fórmula 2.14 la concentración del componente *i* en el flujo de permeado, se obtiene la ecuación 2.15:

$$C_{Pi} = \frac{(Q_F \cdot C_{Fi}) - (Q_R \cdot C_{Ri})}{Q_P} \quad 2.15$$

Por otro lado, tras conocer la concentración del componente *i* en la corriente de alimentación, el porcentaje de rechazo de la membrana aplicada (*R*) y el rendimiento global del sistema, se tiene que (ecuación 2.16):

$$C_{Ri} = \frac{R \cdot C_{Fi}}{1 - \eta} \quad 2.16$$

Una vez obtenido las concentraciones de cada uno de los componentes que se encuentran en los caudales de permeado y rechazo, la suma de ellos dará como resultado los TDS en cada corriente (Ibañez, 2009).

2.2.9 Cálculo de la presión osmótica

Según Abarca (2018), si a cada lado de la membrana semipermeable se encuentran dos disoluciones acuosas de desiguales concentraciones se forma un diferencial de presión en ambas partes, este fenómeno recibe el nombre de presión osmótica.

Es necesario aplicar una presión superior a la presión osmótica al lado de la disolución, para que el agua fluya desde la solución más concentrada hacia la de menor concentración, donde se obtiene, por tanto, un agua de pureza admisible. Por ello, es importante conocer la presión osmótica del agua de alimentación, ya que a partir de ella se determinará la presión de trabajo de las bombas de alta presión. Esta última condicionará el consumo energético del proceso, de aquí, su gran importancia.

Consideraciones termodinámicas permiten establecer que la relación existente entre la presión osmótica de una solución y la concentración de sustancias que la componen viene dada por la ecuación 2.17:

$$\pi = - \left[\frac{R}{T \cdot V_0} \right] \cdot \ln a_0 \quad 2.17$$

Donde:

π : presión osmótica de la solución, expresada en bar

a_0 : actividad del solvente (agua)

R: constante de los gases perfectos

T: temperatura absoluta, en Kelvin

V_0 : volumen molar parcial del solvente en la solución

La actividad del agua en una solución, si se tiene en cuenta que en 1 kg de agua hay 55,51 mol, viene dada por la ecuación 2.18:

$$\ln a_0 = \frac{\sum m_i}{55.51} \cdot \phi \quad 2.18$$

Sustituyendo el valor de la actividad del agua en la expresión 2.17 obtenemos que la presión osmótica queda (ecuación 2.19):

$$\pi = 0.08308 \cdot \phi \cdot (t + 273,16) \cdot \sum m_i \quad 2.19$$

Donde:

π : presión osmótica, expresada en bar

ϕ : coeficiente osmótico del disolvente

t: temperatura del agua, en °C

$\sum m_i$: sumatoria de las molalidades de todos los constituyentes de la solución, tanto iónicos como no iónicos

La molalidad de cada componente se determina a través de la siguiente ecuación:

$$m_i = \frac{C_i}{1000 \cdot M_i \cdot \frac{10^6 - STD}{10^6}} \quad 2.20$$

Donde:

C_i : concentración del componente i de la solución, expresada en mg/L

M_i : masa molar del componente i

STD: contenido en sales totales de la solución, en mg/L

Y el coeficiente osmótico del disolvente ϕ se obtiene por la vía siguiente (ecuación 2.21):

$$\phi = 1 - \frac{S}{3,375 \cdot I} \cdot \left(A - 2 \cdot \ln A - \frac{1}{A} \right) + B \cdot I' + C \cdot (I')^2 \quad 2.21$$

Donde:

I: fuerza iónica (ecuación 2.22)

I' : molalidad de una sal que correspondiera a un electrolito 1-1 y cuya masa molar fuera el promedio de las sales (masa molar aparente) (ecuación 2.23)

S, A, B y C: coeficientes empíricos

Se calculan a través de las siguientes expresiones:

$$I = \frac{1}{2} \cdot \sum (m_i \cdot Z_i^2) \quad 2.22$$

$$I' = \frac{1}{2} \cdot \sum m_i \quad 2.23$$

$$S = 1,17202 \cdot \left(\frac{\sum m_i \cdot Z_i^2}{\sum m_i} \right) \cdot \left[\frac{23375,556}{D \cdot (t+273,16)} \right]^{\frac{3}{2}} \cdot \rho^{\frac{1}{2}} \quad 2.24$$

Donde la densidad (ρ) se calcula (ecuación 2.25):

$$\rho = 1,00157 - 1,56096 \cdot 10^{-4} \cdot T - 2,69491 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 \quad 2.25$$

Los coeficientes empíricos A, B, C y D, se calculan a través de las ecuaciones 2.26, 2.27, 2.28 y 2.29 respectivamente.

$$A = 1 + 1.5 \cdot \left(\frac{1}{I^2}\right) \quad 2.26$$

$$B = 6,72817 - \frac{348,662}{T+273,16} - 0,971307 \cdot \ln(t + 273,16) \quad 2.27$$

$$C = \frac{40,5016}{(t+273,16)} - 0,721404 + 0,103915 \cdot \ln(t + 273,16) \quad 2.28$$

$$D = 233,76 + \frac{5321}{(t+273,16)} - 0,9297 \cdot (t + 273,16) + 0,001417 \cdot (t + 273,16)^2 - 8,292 \cdot 10^{-7} \cdot (t + 273,16)^3 \quad 2.29$$

2.2.10 Cálculo del número de membranas y tubos de presión

Abarca (2018) plantea que tras conocer el flujo de agua que es necesario conseguir y los datos técnicos de la membrana seleccionada, se puede realizar una apreciación inicial del número de membranas que necesitará el bastidor de ósmosis inversa.

El número de membranas está representado por la letra N y se determina a través de la ecuación 2.30:

$$N = \frac{Q_p}{J \cdot A} \quad 2.30$$

Donde:

Q_p : caudal de permeado que se quiere obtener

J: flujo específico y se define como el volumen producido de agua desalada por unidad de superficie de membrana instalada y unidad de tiempo, como se muestra en la ecuación 2.31. Se expresa en $m^3/(m^2 \cdot \text{día})$.

$$J = \frac{Q}{A} \quad 2.31$$

A: área nominal de la membrana

Una vez estimado el número de membranas necesarios para la instalación, se procede al cálculo del número de tubos, donde, según recomendaciones del fabricante se debe utilizar siete membranas por tubo de presión, por lo tanto, el número total de tubos se determina a través de la fórmula 2.32:

$$n^\circ \text{ de tubos de presión} = \frac{N}{7} \quad 2.32$$

2.2.11 Normalización del sistema

El sistema instalado no funciona durante todo el tiempo con los rendimientos teóricos, por lo que es necesario realizar la normalización del sistema.

Cuando se diseña una planta de ósmosis inversa, hay que saber que las membranas nunca trabajan a flujo máximo, por lo tanto, para conocer su productividad real, es necesario realizar

unas correcciones que tengan en cuenta las variaciones de los diferentes factores que influyen en los caudales específicos con respecto a las condiciones normalizadas. Las tres variables a considerar son:

- temperatura del agua de alimentación
- presión de operación
- tiempo de operación de la planta

2.2.12 Cálculo de los factores correctores

Según Cabezas (2013) los factores que influyen en los caudales específicos son:

- **Factor corrector de temperatura (TCF)**

Una inadecuada temperatura del agua de alimentación trae consigo daños considerables a las membranas, pues afecta la productividad, su degradación físico-química y la solubilidad de determinadas sales. Los fabricantes de membranas calculan la productividad de las mismas a 25°C, pero en la práctica raramente se tiene el agua de alimentación a esta temperatura, su variación altera la productividad en un 2 o 3 % por cada grado de aumento o disminución.

Para calcular el factor corrector de temperatura, *Filmtec* establece las ecuaciones 2.33 y 2.34:

$$TCF = EXP \left[2640 \cdot \left(\frac{1}{298} - \frac{1}{273+T} \right) \right] \quad T \geq 25 \text{ °C} \quad 2.33$$

$$TCF = EXP \left[3020 \cdot \left(\frac{1}{298} - \frac{1}{273+T} \right) \right] \quad T < 25 \text{ °C} \quad 2.34$$

- **Factor corrector de presión (f_p)**

El factor corrector de presión se concreta como (ecuación 2.35):

$$f_p = \frac{(P_m - \Delta\pi)_{operación}}{(P_m - \Delta\pi)_{prueba}} \quad 2.35$$

Donde:

$(P_m - \Delta\pi)$: diferencia entre la presión existente a un lado de la membrana y la presión osmótica que corresponde a ese mismo lado, por tanto, diferencia efectiva de presiones que ocasiona el flujo a través de la membrana, es la fuerza motriz del proceso de separación.

P_m : presión requerida en las condiciones de operación existentes para obtener una adecuada separación (presión aplicada a la membrana) y se obtiene a través de la ecuación 2.36:

$$P_m = \frac{J_d}{A} + \Delta\pi_{F-R} \quad 2.36$$

$\Delta\pi$: diferencial de presión osmótica

- **Factor corrector del tiempo de operación:**

Las membranas se ven sometidas a deterioros significantes a lo largo del período de operación, donde experimentan cambios en sus estructuras físicas internas y en sus superficies, las cuales ocasionan un fenómeno de compactación y de esta forma un caudal de agua a través de las membranas deficiente. El factor de disminución de permeado con el tiempo de operación se define según la ecuación 2.37:

$$f_t = \frac{Q_p(t)}{Q_p(0)} \quad 2.37$$

Donde:

$Q_p(t)$: caudal de agua a tiempo t de operación de la planta

$Q_p(0)$: caudal de agua en el momento de puesta en marcha la planta

Luego de obtener los factores correctores se procede al cálculo del flujo de diseño, que se define por la expresión 2.38:

$$Q_d = Q_n \cdot f_p \cdot TCF \cdot f_t \quad 2.38$$

Donde:

Q_d : caudal de diseño de la membrana

Q_n : caudal nominal de la membrana

2.2.13 Cálculo de la presión de operación

El cálculo de la presión de operación, constituye un paso indispensable en el diseño de una planta de ósmosis inversa, pues es la encargada de vencer la presión osmótica y garantizar una adecuada separación. Además, condiciona la economía del proceso. Muelas (2011) plantea que el cálculo de la presión de operación se define como (ecuación 2.39):

$$P_d = \frac{J_d}{A} + \Delta\pi \quad 2.39$$

En la expresión no se tiene en cuenta las pérdidas de presión que se originan en el sistema de bombeo, por lo que es necesario determinar la presión óptima de rendimiento de la bomba de alta presión a través de la ecuación 2.40:

$$PRB = P_d + (0,10 \cdot \Delta P^* + 0,2) \quad 2.40$$

Donde:

ΔP^* : diferencia de presión neta y se precisa como (ecuación 2.41):

$$\Delta P^* = P_d - \Delta\pi_{F-R} \quad 2.41$$

2.3 Selección del sistema de recuperación de energía

Para la selección del sistema de recuperación de energía en la planta, es necesario realizar un estudio de los sistemas más utilizados actualmente. Es preciso comprender que el mayor gasto energético en la instalación, se debe al bombeo a alta presión que conlleva el agua para el paso a través de la membrana, por tanto, se deben detallar adecuadamente cada sistema para poder elegir el más apropiado. Cabezas (2013) plantea que los sistemas de recuperación más manejados son:

1. Sistema de recuperación con turbina Pelton.
2. Sistema de recuperación mediante recuperadores rotativos de transferencia de presión.

A continuación, se puntualizan brevemente cada uno de los sistemas.

2.3.1 Sistema de recuperación con turbina Pelton

Para recuperar la energía que existe en la corriente de rechazo se ajusta una turbina al eje del motor que acciona la bomba de alta presión. Este concepto permite un motor más pequeño, y, por lo tanto, el costo necesario para accionar la bomba será menor. En el anexo 16 se muestra un esquema del sistema de recuperación de energía con una turbina Pelton.

Como se muestra en el anexo 16, la corriente de rechazo se introduce en los inyectores de la turbina donde la energía existente en forma de presión se transforma en energía cinética de traslación. De esta forma, el motor eléctrico de accionamiento solo tiene que aportar la energía que requiere la bomba menos la que recupera la turbina.

Para determinar la energía que se recupera de la corriente de rechazo, es decir, la eficiencia energética de proceso, es necesario determinar qué porcentaje de la energía hidráulica existente en el rechazo se recupera y es utilizada. Para determinar la eficiencia del proceso Cabeza (2013) plantea (ecuación 2.42):

$$\eta = \eta_{turbina} \cdot \eta_{bomba} \cdot \eta_{motor} \quad 2.42$$

Donde:

$\eta_{turbina}$: eficiencia de la turbina (estimado)

η_{bomba} : eficiencia de la bomba (estimado)

η_{motor} : eficiencia del motor (estimado)

Por otro lado, se necesita determinar el consumo específico del sistema.

Para calcular la energía hidráulica que contiene la corriente de rechazo se parte de la ecuación 2.43:

$$PW_R = Q_R \cdot H_R \quad 2.43$$

Donde:

PW_R es la potencia en kW de la corriente de rechazo

Q_R es el caudal de rechazo en m^3/h

H_R es la presión expresada como altura de columna de agua (dato), con unidades m.c.a

Si se conoce que 10 m.c.a equivalen a $1kg/cm^2$ y 1 kWh a 367 kg, se define que:

$$PW_R = \frac{Q_R \cdot H_R}{367} \quad 2.44$$

Una vez determinada la energía hidráulica que presenta la corriente de rechazo, se procede a obtener la potencia que recupera la turbina en su eje a través de la ecuación 2.45:

$$PW_{turbina} = PW_R \cdot \eta_{turbina} \quad 2.45$$

Luego, la potencia absorbida en el eje de la bomba de alta presión será:

$$PW_{bomba} = \frac{Q_F \cdot H_F}{367 \cdot \eta_{bomba}} \quad 2.46$$

Por lo tanto, tras conocer la potencia que recupera la turbina en su eje y la potencia absorbida en el eje de la bomba, se calcula la potencia neta que debe aportar el eje del motor:

$$PW_{motor} = PW_{bomba} - PW_{turbina} \quad 2.47$$

Si el rendimiento del motor no equivale a 100 %, significa que no transfiere toda la energía eléctrica en mecánica, por lo tanto, la energía eléctrica que se debe aportar al sistema es:

$$PW_{eléctrica} = \frac{PW_{motor}}{\eta_{motor}} \quad 2.48$$

Una vez conocida la potencia eléctrica que necesita el sistema, se determina el consumo específico de energía por m^3 de agua permeada producida cada hora:

$$\text{Consumo específico de energía} = \frac{PW_{eléctrica}}{Q_P} \quad 2.49$$

2.3.2 Sistema de recuperación con intercambiadores de presión:

Un intercambiador de presión se basa en la transferencia de presión de una corriente de fluido de alta presión a una corriente de fluido de baja presión. El proceso de ósmosis inversa opera a elevadas presiones, por lo que posee una corriente de rechazo con alta presión, el intercambiador tiene la función de transferirla, al agua de alimentación sin convertirla previamente en energía mecánica de rotación. En el anexo 17 se muestra el esquema de recuperación con intercambiadores de presión.

A la salida del intercambiador de presión se instala una bomba de recirculación, que asume la función de impulsar un caudal de agua ligeramente inferior al caudal del rechazo, debido a pérdidas que se producen en el interior del intercambiador, por lo que la bomba de alta presión

solo debe suministrar el caudal de agua que falta, es decir, un caudal ligeramente superior al caudal de permeado.

Para determinar la eficiencia energética del proceso, es necesario estimar los rendimientos de la bomba de recirculación y del motor (Ibañez, 2009) (ecuación 2.50):

$$\eta = \eta_{bomba\ de\ recirculación} \cdot \eta_{motor} \quad 2.50$$

Para establecer el consumo específico del sistema se necesita estimar el rendimiento de la bomba de alta presión y del motor (ecuaciones 2.51 y 2.52):

$$PW_{bomba\ de\ alta\ presión} = \frac{Q_F \cdot H_F}{367 \cdot \eta_{bomba\ de\ alta\ presión}} \quad 2.51$$

$$PW_{eléctrica\ de\ la\ bomba\ de\ alta\ presión} = \frac{PW_{bomba\ de\ alta\ presión}}{\eta_{motor}} \quad 2.52$$

Se determina además el consumo de la bomba de recirculación instalada, pues para determinar la potencia total consumida, hay que añadirle a la potencia eléctrica de la bomba de alta presión, la potencia de la bomba instalada (ecuaciones 2.23 y 2.54).

$$PW_{bomba\ de\ recirculación} = \frac{Q_R \cdot H_R}{367 \cdot \eta_{bomba\ de\ recirculación}} \quad 2.53$$

$$PW_{eléctrica\ de\ la\ bomba\ de\ recirculación} = \frac{PW_{bomba\ de\ recirculación}}{\eta_{motor}} \quad 2.54$$

Por lo tanto, la potencia consumida por el sistema es (ecuación 2.55):

$$PW_{eléctrica\ total} = PW_{eléctrica\ de\ la\ bomba\ de\ alta\ P} + PW_{eléctrica\ de\ la\ bomba\ de\ recirc} \quad 2.55$$

Luego, se divide entre los m³ por hora que se producen en la planta y se obtiene que el consumo específico de energía es de (ecuación 2.56):

$$Consumo\ específico\ de\ la\ planta = \frac{PW_{eléctrica\ total}}{Q_P} \quad 2.56$$

Una vez obtenido el consumo específico por cada sistema de recuperación de energía, se realiza una comparación entre ellos para decretar cual resulta más factible para la planta de ósmosis inversa.

2.4 Metodología para determinar la factibilidad económica de la propuesta

En el siguiente acápite se realizará un breve análisis de la metodología que utiliza el programa ROSA para determinar la factibilidad económica de la planta de ósmosis inversa.

2.4.1 Parámetros Económicos: el NPV

El *Net Present Value* (NPV), en español Valor Actual Neto (VAN) es un parámetro que permite determinar la rentabilidad de un proyecto o de una inversión.

Como su propio nombre indica, el NPV permite calcular el valor presente de un determinado número de flujos de caja futuros, originados por una inversión. La metodología consiste en descontar al momento actual (es decir, actualizar mediante una tasa) todos los flujos de caja futuros del proyecto. A este valor se le resta la inversión inicial, de tal modo que el valor obtenido es el valor actual neto del proyecto. La fórmula 2.57 muestra como calcular el NPV de una inversión (Abarca, 2018):

$$NPV = \left(\sum_{t=1}^n \frac{V_t}{(1+k)^t} \right) - I_0 \quad 2.57$$

Donde:

V_t : los flujos de caja en cada período t

I_0 : el desembolso inicial de la inversión

N : el número de períodos considerado

k : el tipo de interés o rentabilidad, fijada por el inversor. Cuanto mayor tipo de interés se fije, se obtendrán menores valores de NPV

Valores positivos de NPV suponen que la inversión producirá ganancias, mientras que valores negativos de NPV indican que la inversión producirá pérdidas.

2.4.2 Cost Analysis (Análisis de Costos)

La sexta y última pestaña principal del *software* ROSA corresponde al *Cost Analysis*, es decir, al análisis de costos. Esta pestaña conduce a una herramienta, llamada EVA (*Element Value Analysis*), que permite al usuario un breve análisis económico comparativo de los diferentes elementos que operan en un mismo sistema bajo las mismas condiciones. El usuario se encontrará con el aspecto de la ventana de *Cost Analysis*, que se muestra en la figura 2.2:

Para una mejor descripción, se decide dividir la ventana de *Cost Analysis* en varias partes, tal y como se muestra en la figura 2.3.

- *Unit Set (Set de Unidades)*

La parte de la figura 2.3 rodeada por un rectángulo azul y marcada con un número 1 corresponde a la selección del set de unidades.

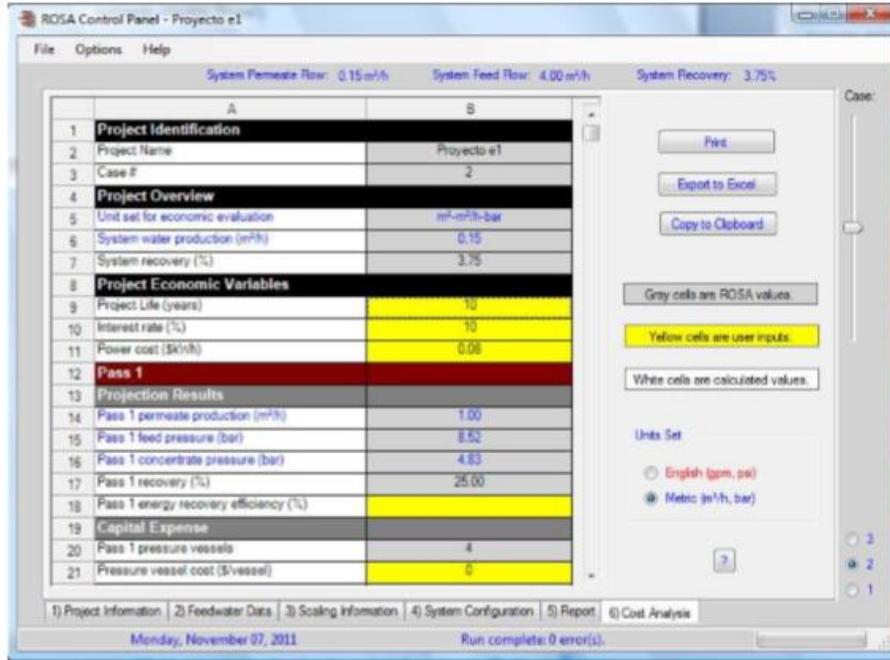


Figura 2.2: Ventana de *Cost Analysis*

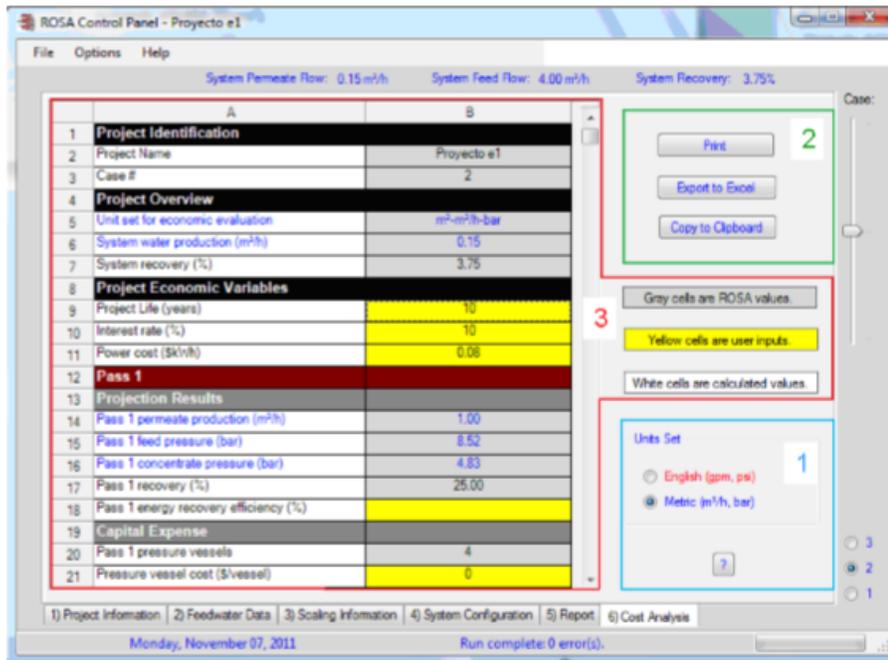


Figura 2.3: Partes de la ventana de *Cost Analysis*

El usuario puede marcar la casilla que desee en función de que set de unidades prefiera que el programa muestre en el análisis de costos:

- **Hoja de Cálculo de EVA**

La parte resaltada en rojo y marcada mediante un número tres en la figura 2.3 corresponde a la hoja de cálculo de EVA.

Como se puede observar en dicha figura, a la derecha de la hoja de cálculo el programa muestra una indicación importante:

- Las celdas grises son valores de ROSA, provenientes de la ejecución del proyecto en la pestaña de *Report*, por lo que el usuario no deberá manipularlas.
- Las celdas amarillas son celdas de entrada, en las que el usuario deberá introducir los valores que estime oportuno para cada variable.
- Las celdas blancas son celdas calculadas automáticamente por la hoja de cálculo de EVA, por lo que el usuario tampoco deberá manipularlas.

Toda la parte izquierda de la figura 2.3 corresponde a la hoja de cálculo en cuestión. Como se puede observar en la barra de desplazamiento vertical, esta hoja es mucho más extensa de lo que se muestra. A continuación, se muestra la hoja de cálculo completa. Debido a su extensión, será presentada en tres figuras: la 2.4a, 2.4b y 2.4c.

	A	B
1	Project Identification	
2	Project Name	Proyecto e1
3	Case #	2
4	Project Overview	
5	Unit set for economic evaluation	m ³ -m ³ /h-bar
6	System water production (m ³ /h)	0.15
7	System recovery (%)	3.75
8	Project Economic Variables	
9	Project Life (years)	10
10	Interest rate (%)	10
11	Power cost (\$/kWh)	0.08
12	Pass 1	
13	Projection Results	
14	Pass 1 permeate production (m ³ /h)	1.00
15	Pass 1 feed pressure (bar)	8.52
16	Pass 1 concentrate pressure (bar)	4.83
17	Pass 1 recovery (%)	25.00
18	Pass 1 energy recovery efficiency (%)	
19	Capital Expense	
20	Pass 1 pressure vessels	4
21	Pressure vessel cost (\$/vessel)	0
22	Pass 1 capital for pressure vessels	\$0.00
23	Product	30HRLE-4040 (4) SW30HRLE-4040
24	Pass 1 total elements	16
25	Element cost (\$/element)	\$0.00
26	Pass 1 capital for elements (\$)	\$0.00
27	Pass 1 capital (\$)	\$0.00
28	Pass 1 capital(\$/m ³)	\$0.00

Figura 2.4a: Hoja de cálculo de EVA (parte 1)

29	Operating Expense	
30	Power	
31	Pass 1 pumping power (kW)	1.18
32	Pass 1 pump specific energy (kWh/m ³)	1.18
33	Brine energy recovery (kWh/m ³)	0.00
34	Pass 1 net energy consumption (kWh/m ³)	1.18
35	Pass 1 net energy cost (\$/year)	\$49.79
36	Energy expense NPV (\$)	305.95
37	Pass 1 energy expense (\$/m ³)	\$0.09
38	Membrane replacement cost	
39	Pass 1 replacement rate (%/year)	13
40	Replacement price (\$/element)	\$0.00
41	Pass 1 replacement cost for elements (\$/year)	\$0.00
42	Pass 1 replacement membrane NPV (\$)	\$0.00
43	Pass 1 membrane replacement expense (\$/m ³)	\$0.00
44	Operating expense subtotal	
45	Pass 1 operating expense NPV (\$)	\$305.95
46	Pass 1 operating expense per m ³	\$0.09
47	Pass 1 Total	
48	Pass 1 cost NPV (\$)	\$0.00
49	Life Cycle Cost (\$/m ³)	\$0.00
50	Pass 2	
51	Projection Results	
52	Pass 2 permeate production (m ³ /h)	0.15
53	Pass 2 feed pressure (bar)	2.42
54	Pass 2 concentrate pressure (bar)	1.46
55	Pass 2 recovery (%)	15.00
56	Capital Expense	

Figura 2.4b: Hoja de cálculo de EVA (parte 2)

	A	B
57	Pass 2 pressure vessels	2
58	Pressure vessel cost (\$/vessel)	0
59	Pass 2 capital for pressure vessels	\$0.00
60	Product	SW30HRLE-4040 (4)
61	Pass 2 total elements	8
62	Element cost (\$/element)	\$0.00
63	Pass 2 capital for elements (\$)	\$0.00
64	Pass 2 capital (\$)	\$0.00
65	Pass 2 capital(\$/m ²)	\$0.00
66	Operating Expense	
67	Power	
68	Pass 2 pumping power (kW)	0.10
69	Pass 2 pump specific energy (kWh/m ³)	0.00
70	Pass 2 net energy cost (\$/year)	\$0.00
71	Pass 2 energy expense NPV (\$)	\$0.00
72	Energy expense (\$/m ³)	\$0.00
73	Membrane replacement cost	
74	Pass 2 replacement rate (%/year)	13
75	Replacement price (\$/element)	\$0.00
76	Pass 2 replacement cost for elements (\$/year)	\$0.00
77	Pass 2 replacement membrane NPV (\$)	\$0.00
78	Pass 2 membrane replacement expense (\$/m ²)	\$0.00
79	Operating expense subtotal	
80	Pass 2 operating expense NPV (\$)	\$0.00
81	Pass 2 operating expense (\$/m ³)	\$0.00
82	Pass 2 Total	
83	Pass 2 cost NPV (\$)	\$0.00
84	Life Cycle Cost (\$/m ³)	#DIV/0!
85	Total System	
86	Capital	\$0.00
87	Operating expense NPV (\$)	\$305.95
88	Cost of water NPV (\$/m ³)	\$0.02

Figura 2.4c: Hoja de cálculo de EVA (parte 3)

A continuación, se dividirá la hoja de cálculo en cada una de sus secciones principales, mostrándose por separado. Se seguirá un orden descendente: desde las casillas correspondientes a la primera fila hasta la fila 88.

1. Sección general del proyecto

Las casillas correspondientes a las 11 primeras filas de la hoja de cálculo corresponden a la sección general del proyecto. En esta parte se describen características globales de la instalación, tal y como se muestra en la figura 2.5.

1	Project Identification	
2	Project Name	Proyecto e1
3	Case #	2
4	Project Overview	
5	Unit set for economic evaluation	m ³ -m ³ /h-bar
6	System water production (m ³ /h)	0.15
7	System recovery (%)	3.75
8	Project Economic Variables	
9	Project Life (years)	10
10	Interest rate (%)	10
11	Power cost (\$kWh)	0.08

Figura 2.5: Hoja de EVA: Sección general del proyecto

Esta sección consta de tres apartados:

- **Project Identification (Identificación del Proyecto):** Este apartado posee dos celdas no manipulables:
 - *Project Name*: muestra el nombre del proyecto.
 - *Case#*: especifica el caso del cual se ha realizado el análisis de costes.
- **Project Overview (Resumen del Proyecto)**

Este apartado consta de tres celdas no manipulables:

- *Unit set for economic evaluation*: muestra el set de unidades que se ha escogido para realizar el análisis de costes.
- *System water production (m³/h)*: indica el caudal de producto que se genera en la instalación (caudal de permeado del último paso).
- *System Recovery (%)*: indica el porcentaje de recuperación que se da en la instalación.
- **Project Economic Variables (Variables Económicas del Proyecto)**

Este apartado engloba tres celdas amarillas, por lo que el usuario deberá rellenarlas:

- *Project Life (years)*: en esta casilla se introduce la cantidad de años de vida útil del proyecto diseñado. Este parámetro será de gran interés para el cálculo del NPV.
- *Interest rate (%)*: en esta casilla se introduce la tasa de interés sobre la que se calculará el NPV.
- *Power Cost (\$kWh)*: en esta casilla se introduce el precio al que el usuario paga la energía, el dólar por kWh .

2. Sección dedicada al paso 1:

Las casillas comprendidas entre la fila 12 y la 49 en las figuras 2.4a y 2.4b corresponden a la sección del análisis de costos dedicada al primer paso de la instalación. Esta sección se muestra en la figura 2.6.

12	Pass 1	
13	Projection Results	
14	Pass 1 permeate production (m ³ /h)	1.00
15	Pass 1 feed pressure (bar)	8.52
16	Pass 1 concentrate pressure (bar)	4.83
17	Pass 1 recovery (%)	25.00
18	Pass 1 energy recovery efficiency (%)	
19	Capital Expense	
20	Pass 1 pressure vessels	4
21	Pressure vessel cost (\$/vessel)	0
22	Pass 1 capital for pressure vessels	\$0.00
23	Product	50HRLE-4040 (4) 50W30HRLE-4040
24	Pass 1 total elements	18
25	Element cost (\$/element)	\$0.00
26	Pass 1 capital for elements (\$)	\$0.00
27	Pass 1 capital (\$)	\$0.00
28	Pass 1 capital(\$/m ³)	\$0.00
29	Operating Expense	
30	Power	
31	Pass 1 pumping power (kW)	1.18
32	Pass 1 pump specific energy (kWh/m ³)	1.18
33	Brine energy recovery (kWh/m ³)	0.00
34	Pass 1 net energy consumption (kWh/m ³)	1.18
35	Pass 1 net energy cost (\$/year)	\$49.79
36	Energy expense NPV (\$)	305.95
37	Pass 1 energy expense (\$/m ³)	\$0.09
38	Membrane replacement cost	
39	Pass 1 replacement rate (%/year)	13
40	Replacement price (\$/element)	\$0.00
41	Pass 1 replacement cost for elements (\$/year)	\$0.00
42	Pass 1 replacement membrane NPV (\$)	\$0.00
43	Pass 1 membrane replacement expense (\$/m ³)	\$0.00
44	Operating expense subtotal	
45	Pass 1 operating expense NPV (\$)	\$305.95
46	Pass 1 operating expense per m ³	\$0.09
47	Pass 1 Total	
48	Pass 1 cost NPV (\$)	\$0.00
49	Life Cycle Cost (\$/m ³)	\$0.00

Figura 2.6: Hoja de EVA: Sección dedicada al paso 1.

Como se puede observar en dicha figura, dentro de la sección dedicada al primer paso hay cuatro apartados, que se explicarán a continuación.

- *Projection Results* (Resultados del Proyecto)

Este apartado consta de cinco casillas: las cuatro primeras son no manipulables, mientras que la quinta deberá ser rellena por el usuario:

- *Pass 1 permeate production* (m³/h): en esta casilla se muestra el caudal de permeado que se produce en el primer paso.
- *Pass 1 feed pressure* (bar): en esta casilla se indica la presión que presenta la corriente de alimentación que entra al paso 1.
- *Pass 1 concentrate pressure* (bar): en esta casilla se muestra la presión que presenta la corriente de concentrado que sale del primer paso.
- *Pass 1 recovery* (%): en esta casilla se indica el porcentaje de recuperación que presenta el primer paso de la instalación.
- *Pass 1 energy recovery efficiency* (%): En las grandes plantas de ósmosis inversa, es común incluir un sistema de recuperación de energía, que transfiere energía de la corriente de concentrado a la de alimentación. Este sistema presentará gran importancia en instalaciones en las que el caudal de concentrado sea elevado con respecto al de permeado.
- Capital Expense (Gastos Fijos)

Este apartado consta de nueve casillas: siete no manipulables y dos que deberán ser rellenas por el usuario.

- *Pass 1 pressure vessels*: esta casilla indica el número de recipientes de presión de los que consta el primer paso.
- *Pressure vessel cost* (\$/vessel): en esta casilla el usuario debe introducir el precio (en dólares) de cada recipiente de presión.
- *Pass 1 capital for pressure vessels*: en esta casilla el programa calcula el costo de todos los recipientes de presión instalados en el primer paso. Esta casilla mostrará el resultado de multiplicar el número de recipientes de presión del primer paso por el precio de cada uno de ellos
- *Product*: esta casilla indica el tipo de elemento que se ha decidido instalar en cada etapa del primer paso. Para ello se indica el tipo de producto que se encuentra dentro de cada recipiente de presión, incluyendo entre paréntesis el número que hay de cada uno de ellos.
- *Pass 1 total elements*: esta casilla indica el número total de elementos instalados en el primer paso.
- *Element cost* (\$/element): en esta casilla, el usuario debe introducir el precio de cada elemento. Si hubiese más de un tipo, se tendría que introducir un precio medio, de tal forma que el costo total fuese correcto.

- *Pass 1 capital for elements* (\$): en esta casilla el programa calcula el costo de todos los elementos instalados en el primer paso. Esta casilla mostrará el resultado de multiplicar el número total de elementos del primer paso por el precio de cada uno de ellos.
- *Pass 1 capital* (\$): en esta casilla el programa calcula el costo fijo total referido al primer paso. Este valor será la suma de la casilla *Pass 1 capital for pressure vessels* y *Pass 1 capital for elements* (\$).
- *Pass 1 capital* (\$/m³): en esta casilla el programa calcula la relación entre los costos fijos del primer paso (en dólares) y el volumen de permeado (en m³) producido en el primer paso durante los años de operación del sistema.

3. Operating Expense (Gastos de Operación)

Este apartado consta de tres subapartados:

- *Power* (Energía)

En este subapartado se indican los gastos de operación referidos al coste de la energía necesaria para mantener la instalación en marcha. Presenta siete casillas no manipulables:

- *Pass 1 pumping power* (kW): en esta casilla el programa muestra la potencia necesaria para el bombeo en el primer paso.
- *Pass 1 pump specific energy* (kWh/m³): esta casilla indica la energía específica del bombeo en el primer paso. Este parámetro es el resultado de dividir la casilla *Pass 1 pumping power* (kW) entre *Pass 1 permeate production* (m³/h).
- *Brine energy recovery* (kWh/m³): esta casilla indica la energía recuperada en el concentrado, expresada en kWh por m³ de permeado. Su valor es negativo, pues es energía que sale del sistema, y dependerá en gran medida del parámetro *Pass 1 energy recovery efficiency* (%).
- *Pass 1 net energy consumption* (KWh/m³): esta casilla muestra el consumo energético neto del primer paso por cada m³ de permeado producido en él. El valor mostrado será el resultado de restar la casilla de *Brine energy recovery* (kWh/m³) a *Pass 1 pump specific energy* (kWh/m³).
- *Pass 1 net energy cost* (\$/year): indica el coste neto anual (en dólares) de la energía utilizada en el paso 1.
- *Energy expense NPV* (\$): indica el parámetro NPV referido a los costos energéticos del primer paso. Este valor se obtiene al aplicar la fórmula 2.57.

- *Pass 1 net energy cost* (\$/year), es decir, de los costos netos anuales de la energía utilizada en el primer paso: tipo de interés (k) del valor introducido en la casilla *Interest Rate* (%) y número de períodos (n) del valor introducido en la casilla de *Project Life* (years). Puesto que sólo se consideran gastos, el valor del NPV saldrá negativo, aunque ROSA lo muestra en valor absoluto.
- *Pass 1 energy expense* (\$/m³): indica el costo de la energía necesaria en el primer paso por cada m³ de permeado producido en dicho paso. El valor de este parámetro es el resultado de multiplicar las casillas *Pass 1 net energy consumption* (KWh/m³) y *Power cost* (\$kWh).
- *Membrane Replacement Cost* (Costo de Reemplazamiento de las Membranas)

Este subapartado consta de cinco casillas: las dos primeras deberán ser rellenas por el usuario, mientras que las tres últimas no son manipulables.

- *Pass 1 replacement rate* (%/year): En esta casilla el usuario debe introducir la tasa con la que se reemplazan los elementos del primer paso. Esta tasa vendrá indicada en el porcentaje de elementos que se cambian cada año.
- *Replacement price* (\$/element): En esta casilla el usuario debe introducir el costo de reemplazar un elemento del primer paso (en dólares).
- *Pass 1 replacement cost for elements* (\$/year): En esta casilla se muestra el costo anual debido al reemplazo de elementos en el primer paso.
- *Pass 1 replacement membrane NPV* (\$): Esta casilla indica el parámetro NPV referido a los costos debidos al recambio de membranas en el primer paso. Este valor se obtiene al aplicar la fórmula del NPV
- *Pass 1 replacement cost for elements* (\$/year), es decir, de los costos anuales debidos al recambio de membranas en el primer paso.
- *Pass 1 membrane replacement expense* (\$/m³): En esta casilla se muestra el costo debido al reemplazo de elementos en el primer paso por cada m³ de permeado producido en él.
- *Operating expense subtotal* (Subtotal de gastos de operación)

Este subapartado muestra el coste subtotal referido a los gastos de operación del primer paso. Presenta dos casillas no manipulables:

- *Pass 1 operating expense NPV* (\$): esta casilla indica los gastos de operación NPV del primer paso. Su valor resulta de la suma de las casillas *Energy expense NPV* (\$) y *Pass 1 replacement membrane NPV* (\$).

- *Pass 1 operating expense per m³*: esta casilla muestra el costo de operación del primer paso por cada m³ de permeado producido en él. Su valor resulta de la suma de las casillas *Pass 1 energy expense (\$/m³)* y *Pass 1 membrane replacement expense (\$/m³)*.

Conclusiones

1. La planta de tratamiento de agua por ósmosis inversa propuesta puede garantizar los volúmenes de agua necesarios para la generación de vapor con las características técnicas requeridas.
2. Para el diseño de la planta de ósmosis inversa se seleccionaron membranas elaboradas de poliamidas aromáticas, que trabajan a media presión, con configuración de arrollamiento en espiral y de modelo BW30.
3. El fabricante de membranas más conveniente para el tratamiento de aguas para la generación de vapor es *Dow Chemical*.
4. La aplicación de la metodología propuesta por *Dow Chemical* permite el diseño, análisis y evaluación técnica-económica de la planta de ósmosis inversa propuesta.

Bibliografía

- Abarca, P. (2018). Agua de alimentación para calderas. ACHS. Dümmer, Chile.
- Andrade, L., James, Ch., Philip, G., & Ku, J. (2017). *Nanofiltration and reverse osmosis applied to gold mining effluent treatment and reuse*. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. Vol. 34, No. 01, pp. 93 - 107, dx.doi.org/10.1590/0104-6632.20170341s20150082.
- Andrade, R., Hormaza, S. A. (2016). *Efecto de la presión y concentración en el porcentaje de rechazo para aguas contaminadas con cromo por ósmosis inversa a nivel de laboratorio*. (Tesis en opción al título de Ingeniero químico), Universidad Nacional del Centro de Perú, Huancayo, Perú.
- Ashfaq, M.Y., Cheng, J., Kim, A., & Park, E. (2020). Investigating the effect of temperature on calcium sulfate scaling of reverse osmosis membranes using FTIR, SEM-EDX and multivariate analysis. *Science of the Total Environment*. Vol. 703.
- Bankiewicz, D. (2012). *Corrosion behaviour of boiler tube materials during combustion of fuels containing Zn and Pb* [en línea]. Academic Dissertation. Åbo Akademi University. [citado 15 marzo 2018]. Disponible en: https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/77050/bankiewicz_dorota.pdf?sequence=2
- Boulaifa, H. Shin, O., Lee, O., Bi, I., & Seung, D. (2019). Demineralization of brackish surface water by reverse osmosis: The first experience in Morocco. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. Vol. 7 (2).
- Cabezas, E. (2013) Externalidades ambientales en la aplicación de Ósmosis Inversa para potabilización de agua sólo para la ingesta. Análisis de costo. Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional. Argentina.
- CDW (2016). *Manganese in Drinking Water*. Document for Public Consultation. Prepared by the Federal-Provincial-Territorial Committee on Drinking Water. Canada.
- Chávez, W., Paredes, C., Pacheco, J., & Changming, S. (2004). Causas de fallas en calderas. *Revista Tecnológica Edición Especial ESPOL Ciencia*. [Consultado: 15 de marzo 2018]. Disponible en: http://www.rte.espol.edu.ec/archivos/Revista_2004/9%20CAUSAS%20DE%20FALLAS.pdf
- Choi, D.W. (2002). *Improve plant water treatment*. Hydrocarbon Processing (International edition) v.81 No.7.42-46.
- Cichowicz, R., Zháo, T., Yáng, Y., Chén, C., & Liú, T. (2016). *Analysis of CO₂ concentration distribution inside and outside small boiler plants*. (ECOL CHEM ENG S.) 2016;23(1):49-60.
- Correa, G., Soto, G., Soto, M., Sáez, C., & Morales, M. (2008). Uso eficiente del agua en Refinería Luján de Cuyo. [en línea]. [Consultado: 15 de marzo de 2018]. Disponible en: <http://biblioteca.iapg.org.ar/iapg/ArchivosAdjuntos/CONAID2/112%20trabajo.PDF> 7

- CUPET. (2017). Reglamento tecnológico de la planta de procesamiento de crudos (Vol. PC-TV/T 0201).
- Da Silva, W., De Lima, T., Pereira, M., & Magdonado, N. (2018). Reverse osmosis desalination plants in Brazil: A cost analysis using three different energy sources. *Sustainable Cities and Society*. Vol. 43. pp. 134 – 143.
- DSS S.A. (2017). Ósmosis inversa. Diseño y soluciones sostenibles. Colombia
- Duarte, E., Fernández, B., Rizo, J., & Pérez, H. (2015). *Estudio comparativo entre la implementación de la zeolita y la resina de intercambio iónico en la remoción de hierro y dureza en un agua sintética que simula el agua para uso industrial*. (Trabajo de grado para optar al título de ingeniero ambiental y sanitario). Universidad de La Salle. Bogotá, Colombia.
- Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Chihuahua. (2009). Intercambio Iónico. [en línea]. Consultado el 30 de Marzo de 2018, Disponible en: <http://www.oocities.org/edrochac/sanitaria/resinasintercambio7.pdf>
- Farah, E. A., Téllez, K., Maza, Y., Bernal, L., & Castillo, J. (2019). Fouling control in reverse osmosis membranes through modification with conductive carbon nanostructures. *Desalination*. Vol. 470.
- Feely, T., Skone, T., Steigel, G., McNemar, M., Nemeth, B., & Schimmoller, J. (2008). *Water: A critical resource in thermoelectric power industry*. *Energy* 33: 1-11.
- Fernández, M. (2015). *Planta de ósmosis inversa de un ferry tipo Ropax*. (Tesis presentada en opción al título de Ingeniería Técnica Naval. Especialidad Estructuras Marinas), Escuela Técnica Superior de Ingeniería Naval y Oceanía, Cartagena, Colombia.
- FILMTEC membrane datasheets (Dow Water Solutions Company), Febrero 2020.
- García, R. Ramírez, B., Castillo, L., & Serra, W. (2019). Recycling of end-of-life reverse osmosis membranes: Comparative LCA and cost-effectiveness analysis at pilot scale. *Resources, Conservation and Recycling*. Vol 150.
- Garud, R. M., Velarde, K., Lubo, L., Barroso, U & Montero, Q. (2011). *A Short Review on Process and Applications of Reverse Osmosis*. *Universal Journal of Environmental Research and Technology*. All Rights Reserved Euresian Publications © eISSN 2249 0256 Available Online at: www.environmentaljournal.org Volume 1, Issue 3: 233-238.
- González, M. C. (2010). “Análisis comparativo de permeadores en plantas de desalación de agua de mar por ósmosis inversa: Recomendaciones sobre selección de diseños.” Proyecto fin de carrera, ETSI. Disponible en <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4909>
- Guanche, J. M. (2016). *Plan de mantenimiento de una Sala de Calderas*. (Tesis en opción al grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática). Universidad de La Laguna.

- Gutierrez, S., Marciano, R., Jimenez, O., Herrera, L., & López, T. (2019). Study of reverse osmosis membranes fouling by inorganic salts and colloidal particles during seawater desalination. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. In press, Journal Pre-proof.
- Haleema, S.S., Schmidt, D., Weber, Q., & Fischer, L. (2020). Nanoparticles in reverse osmosis membranes for desalination: A state of the art review. *Desalination*. Vol. 475.
- Hasson, D., Sanvicente, M., Montaya, R., & Chami, S. (2019). Intermediate concentrate demineralization techniques for enhanced brackish water reverse osmosis water recovery – A review. *Desalination*. Vol. 466. pp. 24-35.
- Ibáñez, J. A. (2009). “Desalación de aguas. Aspectos tecnológicos, medioambientales, jurídicos y económicos”. Edición: Instituto Euromediterráneo del agua, ISBN 978-84-936326-6-3
- Jungbin, K., Arquilla, M., Luna, W., & Attar, J. (2019). A comprehensive review of energy consumption of seawater reverse osmosis desalination plants. *Applied energy*. Vol. 254.
- Karlsson, E. (2017). *The Formation and Dissolution of Sodium Salt Scales in Black Liquor Evaporators*. Gothenburg. 75 h. Thesis for the degree of Doctor of Philosophy. CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY.
- Kavitha, J. Malki, S., Aldana, J., & Bauer, Q. (2019). Pretreatment processes for seawater reverse osmosis desalination systems—A review. [*Journal of Water Process Engineering*](#). Vol. 32.
- Kiho, P., Koch, L., Rossi, A., & Becher, R. (2020). Towards a low-energy seawater reverse osmosis desalination plant: A review and theoretical analysis for future directions. *Journal of Membranes Science*. Vol. 595.
- Kremer, M., Kleiber, L., Meinl, R., & Shell, G. (2011). *SPRING CLEANING: RURAL WATER IMPACTS, VALUATION, AND PROPERTY RIGHTS INSTITUTIONS; The Quarterly Journal of Economics*. 126, 145–205. doi:10.1093/qje/qjq010.
- Kritzberg, E., Ekström, S. M., Zweig, F., & Fotchen, G. (2012). *Increasing iron concentrations in surface waters – a factor behind brownification? Biogeosciences*. No. 9. 1465–1478, 2012. [citado 18 marzo 2018]. Disponible en: www.biogeosciences.net/9/1465/2012/ doi: 10.5194/bg-9-1465-2012.
- Kucera, J. (2015). Reverse osmosis. Industrial processes and applications. 2nd ed. John Wiley and Sons: Massachusetts
- Kumar, K. (2017). *Corrosion Mapping of Water Wall Tubes of Boiler using LFET*. *Journal of Engineering Research and Application* [en línea]. ISSN: 2248-9622, Vol. 7, Issue 11, (Part -6), pp.23-29. [Consultado el 20 de marzo del 2018] Disponible en: http://www.ijera.com/papers/Vol7_issue11/Part-6/D0711062329.pdf
- Kumari, A., Berry, K., Bonnet, A., & Lemaire, F. (2015). *Impact of Boiler Water Chemistry on Waterside Tube Failures*. *IJIRST –International Journal for Innovative Research in*

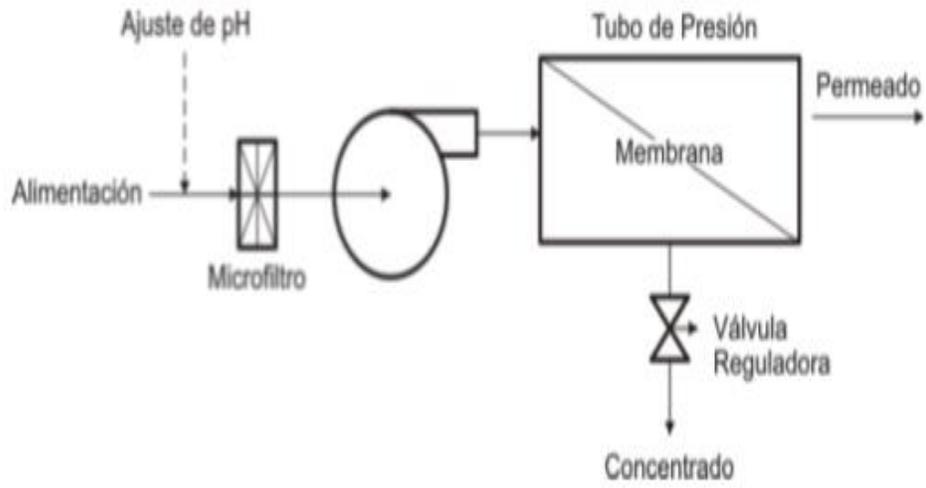
- Science & Technology*. [en línea]. Volume 2. ISSN 2349-6010. [citado 27 marzo 2018]. Disponible en: <http://www.ijirst.org/articles/IJIRSTV2I4008.pdf>
- Kyoung, H., Duyal, D., Leroy, A., Joly, G. (2020). Determination of optimal design factors and operating conditions in a large-scale seawater reverse osmosis desalination plant. *Journal of Cleaner Production*. Vol 244, 118918.
- Lara, J. (2008). *Eliminación de nutrientes mediante procesos de membrana*. (Tesis en opción al título de Ingeniero Civil), Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, España.
- Lilane, A., Brow, L., Quevedo, S., & Balday, j. (2019). Modeling and simulation of the performances of the reverse osmosis membrane. *Material today: proceeding*. Inpress, corrected proof.
- Liu, M., Geum, M., Kwan, A., & Hyo, H. (2019). In situ modification of polyamide reverse osmosis membrane module for improved fouling resistance. *Chemical Engineering Research and Design*. Vol. 141, Pages 402-412.
- López, M. J. (2015). *Diseño de planta de tratamiento de agua potable por ósmosis inversa para un buque de pasaje*. (Trabajo de fin de grado para obtener el título de Ingeniería Marítima). Escuela Técnica Superior de Náutica. Universidad de Cantabria. España.
- Manahan, S. E. (2007). Introducción a la química ambiental. Ed. Reveté, S.A.de C.V. 231-234.
- Matin, A., Ahn, L., Min, K., & Chul, K. (2019). Scaling of reverse osmosis membranes used in water desalination: Phenomena, impact, and control; future directions. *Desalination*. Vol 455.pp 135-157.
- Mohammad, S., Arafat, A., Bathich, M., Gattas, L., & Karaba, M. (2019). Salinization density index, turbidity and oxidation-reduction potential parameters in seawater reverse osmosis desalination. *Water Science and Engineering*. Vol 12. pp 115-120.
- Moreno, J. A. (2011). *Diseño de planta de tratamiento de agua de ósmosis inversa para la empresa Doger Osmotech de Colombia*. (Pasantía para optar por el título de Ingeniero Mecatrónico), Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali, Colombia.
- Muelas, A. (2011). *Manual de utilización del software "ROSA" para simulación de unidades de ósmosis inversa*. (Tesis en opción al título de Química Industrial), Universidad de Zaragoza, España.
- Mullaney, R., Traoré, G., Pelaez, L., & Gaviria, D. (2009). *Chloride in Groundwater and Surface Water in Areas Underlain by the Glacial Aquifer System, Northern United States* [en línea]. Scientific Investigations Report 2009–5086. 41 p. [Consulta: 14 Abril 2018] Disponible en: <https://pubs.usgs.gov/sir/2009/5086/pdf/sir2009-5086.pdf>
- Navarro, M., y Ramos, V. (2011). "Diseño de una planta desaladora por ósmosis inversa en la isla de Fuerteventura". (Proyecto fin de carrera). Universidad de Cádiz. Disponible en <http://rodin.uca.es/xmlui/handle/10498/14949>

- Nevárez, M. E. (2009). Optimización del proceso de regeneración de resinas de intercambio iónico para ser utilizadas en el desmineralizador de agua de refinería estatal esmeraldas” Escuela superior politécnica de Chimborazo. Ecuador. 26, 27, 30, 44-68
- Nuñez, A. (2017). *Evaluación integral de la planta de tratamiento del agua de alimentación a los generadores de vapor de la planta de procesamiento de crudo EPEP-Centro*. (Trabajo de Diploma presentado como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Químico). Universidad de Matanzas.
- Oelker, A. (2016). Tratamiento de agua para calderas. Thermal engineering LTDA: Chile.
- Ortiz, A.L y Tavera, C.E. (2013). *Tratamiento de agua para alimentación de caldera*. (Tesis en opción al título de Ingeniero Químico Petrolero). Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas. Instituto Politécnico Nacional. México D.F.
- Osman, M., Zambrano, L., Flores, J., & Quispe, K. (2020). Operation of conventional and unconventional energy sources to drive a reverse osmosis desalination plant in Sinai Peninsula, Egypt. *Renewable Energy*. Vol 145. Pp 141 – 152.
- Peñate, B. (2010). “*Hybrid reverse osmosis membrane interstage design: thermo-economic analysis*”, (Tesis Doctoral), Universidad de Sevilla.
- Pérez, Q.D., Sierra, A.I., Fajardo, G.M., & Ramírez, A. (2006). Ciencias Experimentales y Tecnología. Preparación de materiales adsorbentes de Hg (II) con fines analíticos y aplicaciones medioambientales. Madrid. Editorial DIKINSON, S.L ISBN: 849772-942-0. 21 y 22.
- Qasim, M., Berg, N., Dumont, K., & Stadt., A. (2019). Reverse osmosis desalination: A state-of-the-art review. *Desalination*. Vol 459 Pags 59-104.
- Ramírez, H., González, K., García, D., & Mena, W. (2017). Disolución de sílice biogénica en sedimentos de lagos utilizados como bioindicadores de calidad del agua. *e-Gnosis* [en línea]. Vol. 5, Art.4 Disponible en: www.e-gnosis.udg.mx/vol5/art3
- Sanz, J.; Guerrero, L.; Roca, M., & Pérez, D. (2006). Producción de Agua de Alta Pureza: Electrodesionización en Continuo (CEDI). VEOLIA Water Solutions & Technologies.
- Senán – Salinas, J., Fernández, L. M., Martínez, K., & Santana, H. (2019). Recycling of end-of-life reverse osmosis membranes: Comparative LCA and cost-effectiveness analysis at pilot scale. *Resources, Conservation and Recycling* Vol. 150.
- Seo, J., Jung, L., Rae, A., & Baek, A. (2015). *On-Site Corrosion Behavior of Water-Treated Boiler Tube Steel*. *Appl Microsc*; 45(3):177-182. [en línea]. [Consulta : 22 Abril 2018] Disponible
- Seyyed, S., Kwan, M., Chul, C., & Kuyng, L. (2020). Novel functionalized graphitic carbon nitride incorporated thin film nanocomposite membranes for high-performance reverse osmosis desalination. *Separation and Purification Technology*. Vol 235.

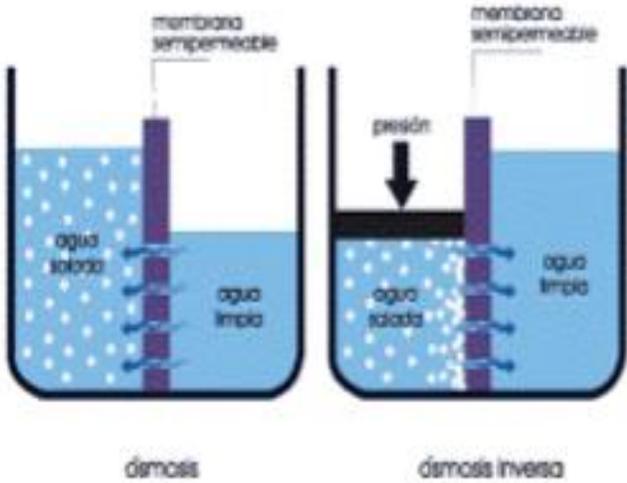
- Smith, K., Perry, M., James, K., & Liane, I. (2020). Water quality induced corrosion of stainless steel valves during long-term service in a reverse osmosis system. *Journal of Environmental Sciences*. Vol. 89, Pages 218-226.
- Spellman, F. R. (2016). Reverse osmosis. A guide for the non-engineering professional. 1st ed. CRC Press LLC: Florida, USA.
- Steinle, Lea., Smith, L., Jones, K., & Collins. (2017). *Effects of low oxygen concentrations on aerobic methane oxidation in seasonally hypoxic coastal waters*. *Biogeosciences*. No. 14. 1631–1645. [en línea]. [Consulta: 14 abril 2018] Disponible en: www.biogeosciences.net/14/1631/2017/ doi:10.5194/bg-14-1631-2017
- Tong, X., Park, A., Suk, N., & Hyun, L. (2020). Fouling properties of reverse osmosis membranes along the feed channel in an industrial-scale system for wastewater reclamation. *Science of The Total Environment*. Vol 713.
- Wang, Z., Kwan, S., Dong, Q., & Hoon, J. (2020). Minimal and zero liquid discharge with reverse osmosis using low-salt-rejection membranes. *Water research*. Vol. 170.
- Yahya, Y., Dak, Z., Park, H., & Seo, M. (2017). Detailed analysis of reverse osmosis systems in hot climate conditions. *Desalination*. [Vol. 423](#), 1 December 2017, Pages 41-51.
- Younos, T., Kim, N., Monash, K., & Hoju, K. (2009). *Water Dependency of Energy Production and Power Generation Systems*. VWRRC Special Report No. SR46-2009. Virginia Polytechnic Institute and State University Blacksburg, Virginia.
- Yunhao, L., Makki, L., Yao, K., Chen, F., & Zhang, L. (2020). High boron removal polyamide reverse osmosis membranes by swelling induced embedding of a sulfonyl molecular plug. *Journal of Membrane Science*. Vol. 597.
- Zhang, Y., Wang, W. N., Cox, C., Geller, M. R., Schwimmer, Y. (2019). Highly permeable and fouling-resistant hollow fiber membranes for reverse osmosis. *Chemical Engineering Science*. Vol. 207. pp. 903 – 910.

Anexos

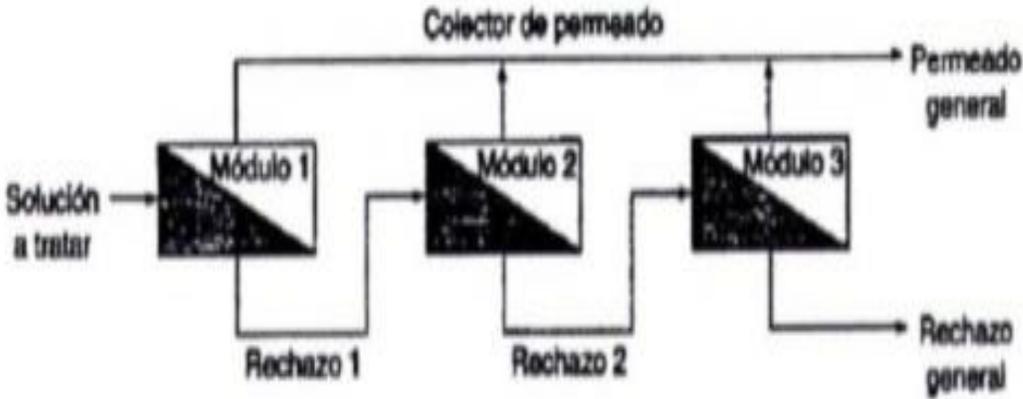
Anexo 1: Esquema del proceso industrial de la ósmosis inversa



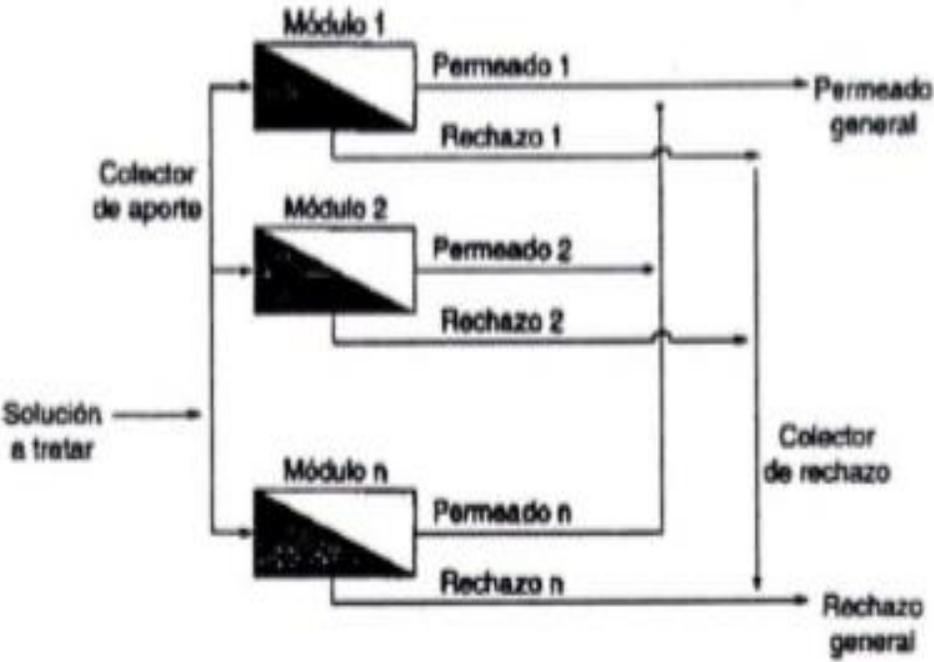
Anexo 2: Esquema del fenómeno de ósmosis y ósmosis inversa



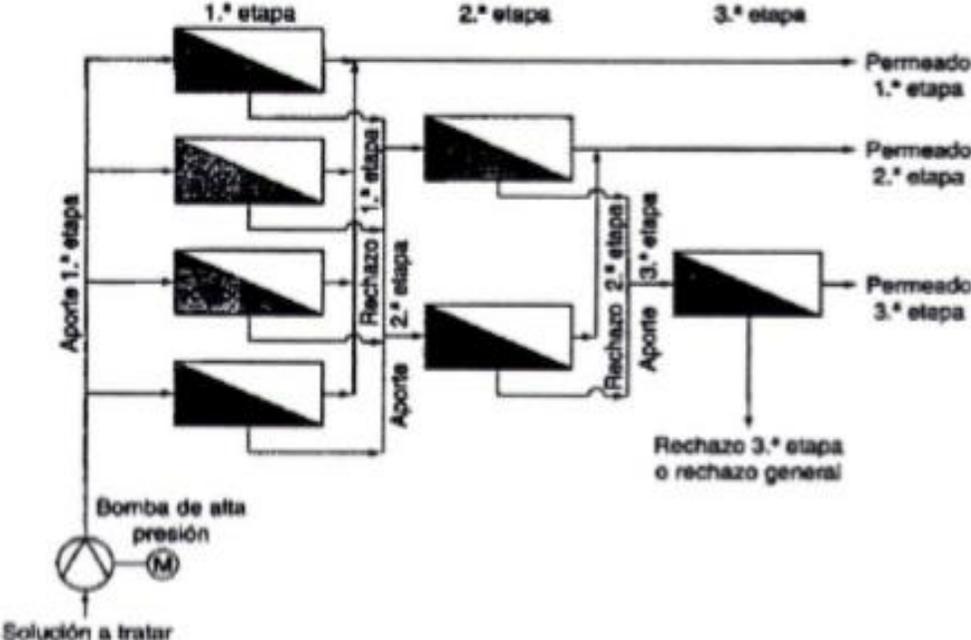
Anexo 3: Módulos en serie



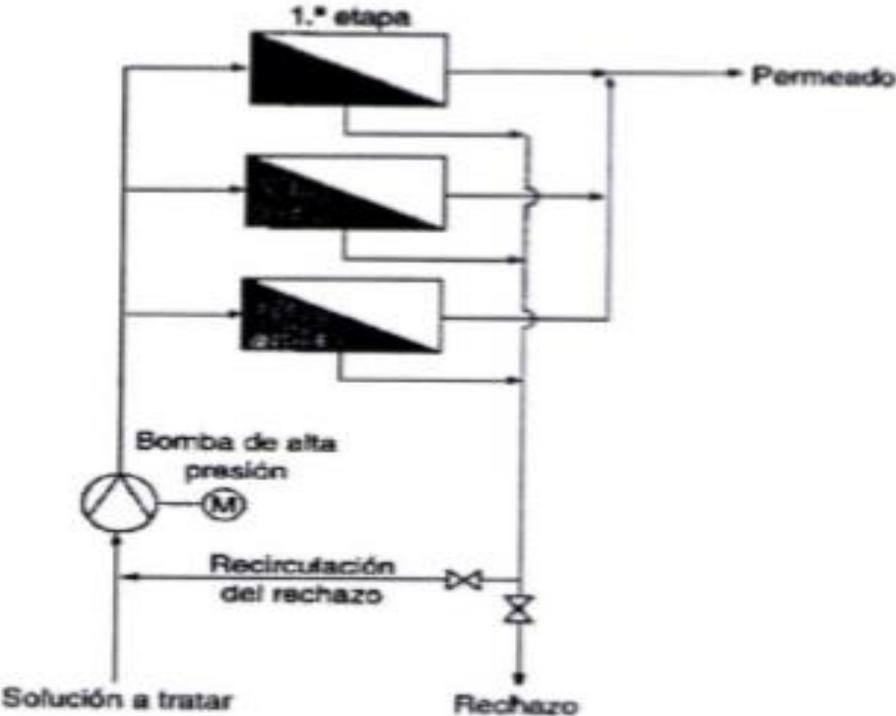
Anexo 4: Módulos en paralelo



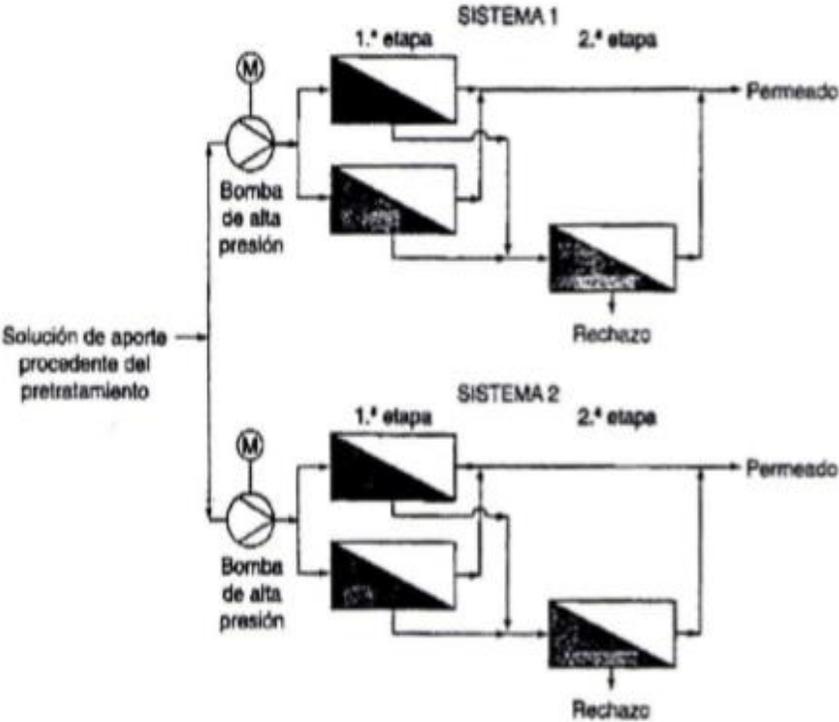
Anexo5: Agrupación de etapas con rechazo en serie



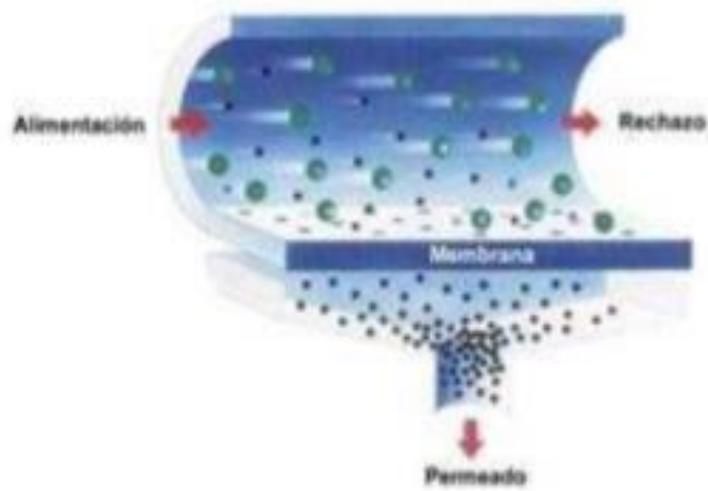
Anexo 6: Agrupación de etapas con recirculación del rechazo



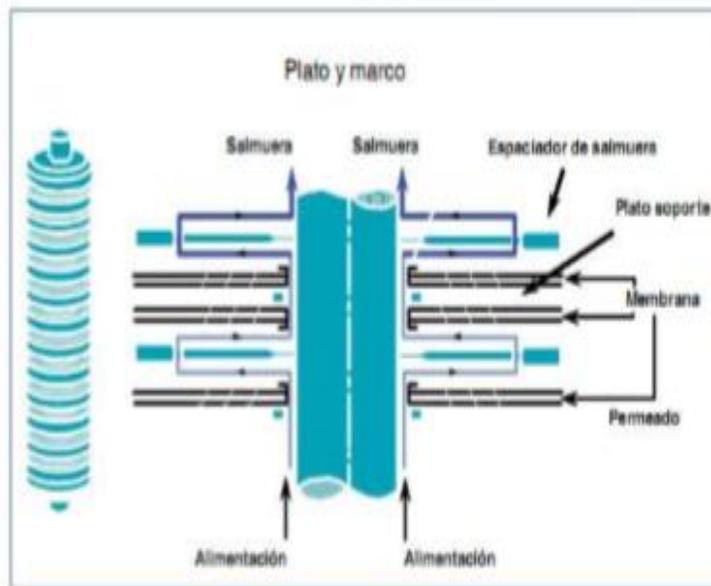
Anexo 7: Agrupación de sistemas trabajando en paralelo



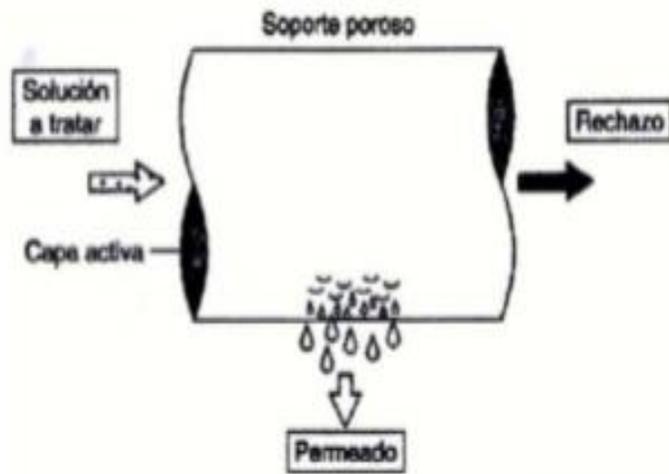
Anexo 8: Esquema de una membrana de ósmosis inversa



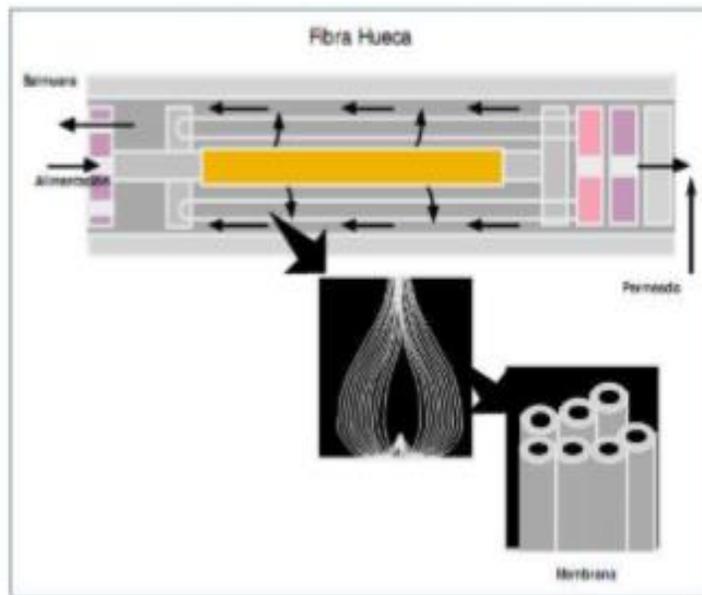
Anexo 9: Esquema de la configuración plato y marco



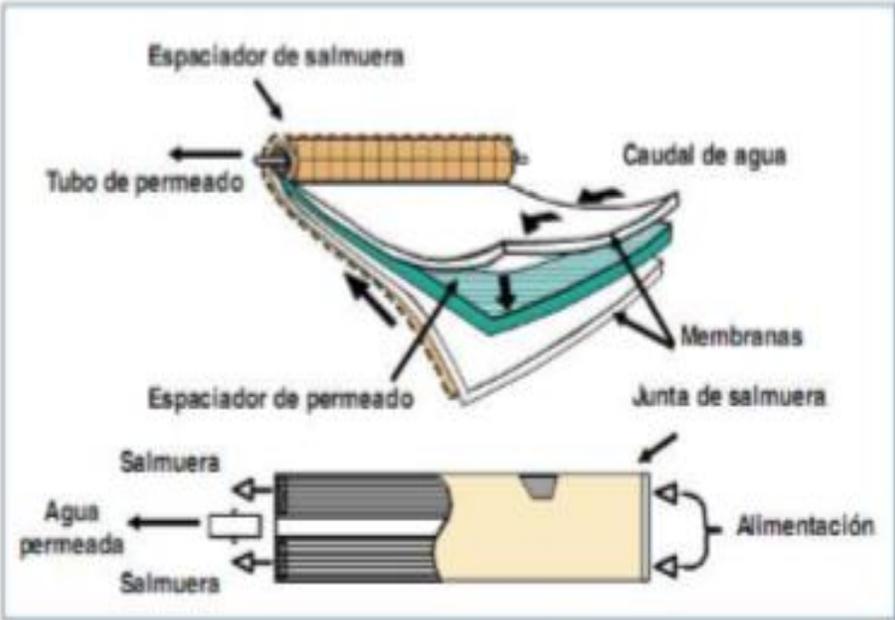
Anexo 10: Flujos en una membrana tubular



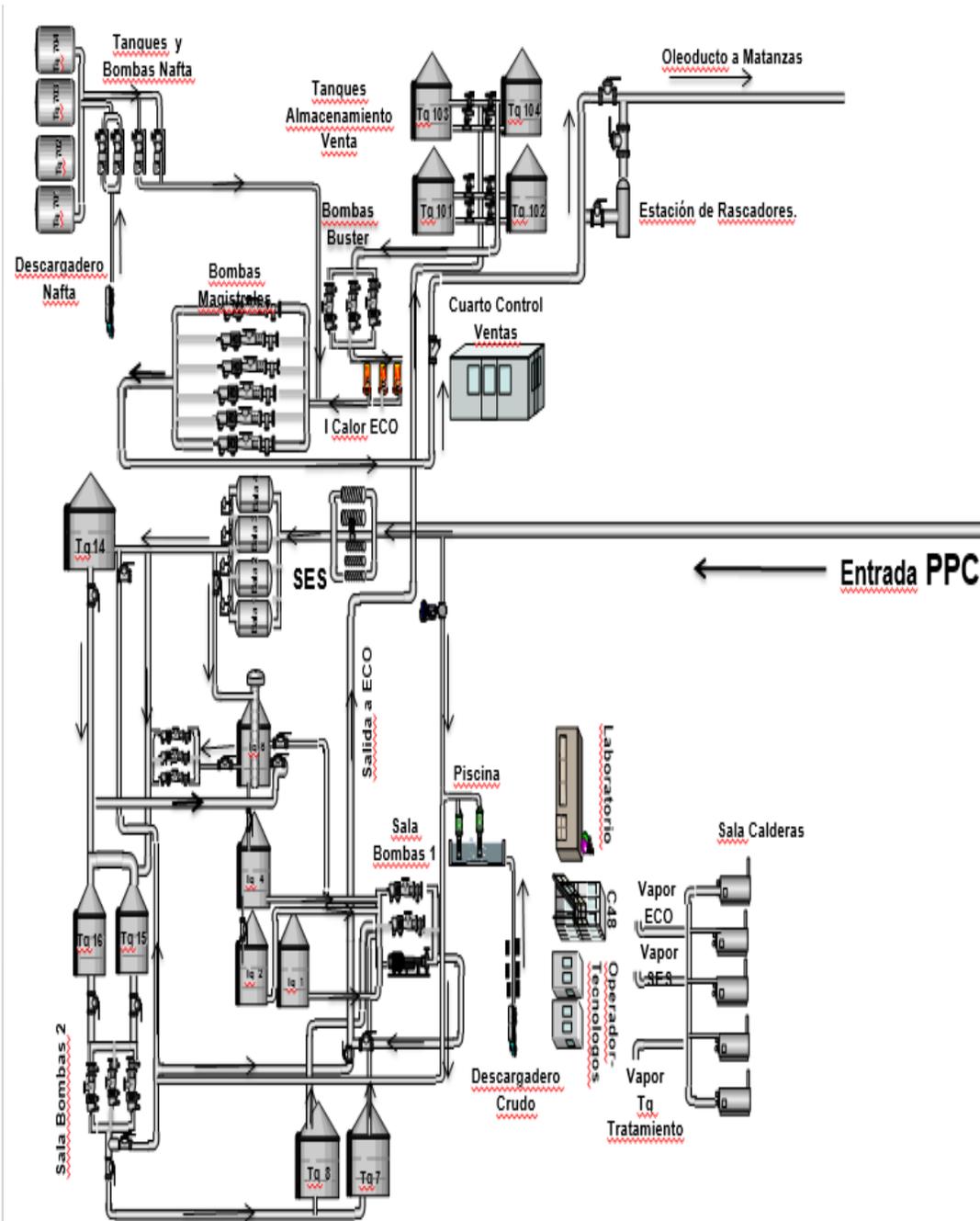
Anexo 11: Esquema de la configuración fibra hueca



Anexo 12: Esquema de la configuración arrollamiento en espiral



Anexo 13: Diagrama de la Planta de Procesamiento de Crudo



Anexo 14: Métodos de análisis del agua. Manual Dinama

Métodos de análisis del agua-manual dinama

A 14.1 Determinación de pH

Método electrométrico

1. Objetivo

Esta normativa técnica se utiliza para la determinación de pH en aguas y efluentes industriales.

2. Definiciones

El pH o la actividad del ión hidrógeno indican a una temperatura dada, la intensidad de las características ácidas o básicas del agua.

El pH se define como el logaritmo de la inversa de la actividad de los iones hidronio,

$$\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$$

$[\text{H}^+]$ = actividad de los iones hidronio en mol/L.

3. Principio

El método consiste en la determinación de la actividad de los iones hidrógeno por medidas potenciométricas usando un electrodo combinado o un electrodo estándar de hidrógeno de vidrio con un electrodo de referencia.

4. Interferencias

4.1 El electrodo de vidrio generalmente no está sujeto a interferencias como color, turbidez, materia coloidal, oxidantes, reductores o alta salinidad, excepto para un error de sodio, que se da a pH mayores de 10. Este error se puede reducir usando un electrodo especial de bajo error de sodio.

4.2 Recubrimientos de material graso o partículas pueden dificultar la respuesta del electrodo. Estos recubrimientos pueden ser removidos con una frotación muy suave o utilizando detergentes, seguido de un enjuague con agua destilada.

Un tratamiento adicional es utilizar ácido clorhídrico para remover cualquier película restante.

4.3 Las medidas de pH son afectadas por la temperatura en dos formas: por efectos mecánicos causados por cambios en las propiedades de los electrodos y por efectos químicos causados por cambio de equilibrios. En el primer caso las interferencias pueden ser controladas utilizando instrumentos que posean compensación de temperatura o calibrando el sistema electrodo-instrumento a la temperatura de las muestras. La segunda fuente de error depende de las muestras y no puede ser controlada, por lo cual se debe reportar la temperatura con cada medida de pH realizada.

5. Muestreo y Preservación

El análisis puede ser realizado tanto en campo como en el laboratorio. En caso de que el análisis se realice en el laboratorio, llenar el recipiente de muestreo completamente sin cámara de aire. Realizar la medida antes de dos horas de recolectada la muestra.

6. Equipos y Materiales

6.1 Medidor de pH.

6.2 Electrodo de referencia de potencial constante y electrodo de vidrio o se puede utilizar un electrodo combinado el cual posee ambos electrodos, de medida y de referencia, en un mismo cuerpo.

6.3 Termómetro o sensor de temperatura para compensación automática en el instrumento.

6.4 Agitador magnético y barras agitadoras.

6.5 Vasos de Bohemia.

7. Reactivos

7.1 Agua destilada y desionizada.

7.2 Agua destilada y desaireada con conductividad menor a 2 umhos/cm. Para desairear calentar a ebullición durante 15 minutos y enfriar.

7.3 Soluciones buffer estándar de pH conocido, necesarias para calibrar el instrumento:

a) Solución buffer de pH = 4,004 a 25 °C.

Pesar 10,12 g de $\text{KHC}_8\text{H}_4\text{O}_4$ y diluirlo a 1 L en matraz aforado con agua destilada.

b) Solución buffer de pH = 6,863 a 25 °C.

Pesar 3,387 g de KH_2PO_4 secado previamente a 110-130 °C durante dos horas y 3,533 g de Na_2HPO_4 . Disolver y llevar a 1 L en matraz aforado con agua destilada.

c) Solución buffer de pH = 10,014 a 25 °C.

Pesar 2,092 g de NaHCO_3 y 2,640 g de Na_2CO_3 , disolver y llevar a 1 L en matraz aforado con agua destilada.

8. Procedimiento

8.1 Calibración del instrumento:

a) Para ello se debe seguir las instrucciones del medidor de pH. En la calibración se usan como mínimo dos de las soluciones buffer, cuyos valores de pH deben cubrir el rango de pH esperado por la muestra a medir.

b) Llevar los buffers y la muestra a la misma temperatura. (Si el equipo lo permita utilizar compensación de temperatura). El valor correspondiente de pH de los buffers debe ser corregido a la temperatura de los mismos.

8.2 Medida:

a) Medir el pH de la muestra indicando la temperatura de la misma.

Realizar la medida con una agitación moderada para minimizar la entrada de dióxido de carbono y suficiente como para homogeneizar la muestra.

b) Una vez finalizada la medida enjuagar y secar suavemente los electrodos y proceder a ubicarlos en la solución de preserva de los mismos.

9. Expresión de resultados

Los resultados se deben reportar en unidades de pH con una precisión de 0.1 y la temperatura con una precisión de 1 °C.

A 14.2 Determinación de Calcio Total

Método de Espectrofotometría de Absorción Atómica por Llama

1. Objetivo

Esta normativa técnica se usa para determinar calcio en aguas y efluentes industriales en el rango de 0,1 a 20,0 mg/L*, es posible determinar mayores o menores concentraciones por dilución o concentración de la muestra respectivamente.

2. Referencias

2.1 Determinación del límite de detección y de cuantificación en Espectrofotometría de Absorción Atómica. Código IIB01.

3. Principio

La muestra es digerida para reducir la interferencia por materia orgánica y convertir todo el metal a una forma libre determinable por Espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA) a 422,8 nm. El contenido de calcio se determina mediante una curva de calibración.

Para muestras de agua con bajo contenido de sólidos en suspensión con una turbidez menor a 1 NTU no es necesario realizar la digestión (punto 8.1).

4. Interferencias

La sensibilidad del calcio se ve disminuida por la presencia de elementos que puedan formar oxisales estables como fósforo, aluminio. Para disminuir este efecto se agrega solución de lantano al 0,5 %.

5. Muestreo y Preservación

Recolectar en frasco de polietileno de alta densidad de 1L de capacidad de cierre hermético. Ajustar a $\text{pH} < 2$ con ácido nítrico. Analizar antes de 6 meses.

6. Equipos y Materiales

6.1 Espectrofotómetro de absorción atómica con llama.

6.2 Plancha calefactora.

6.3 Balanza analítica de precisión 10 mg.

6.4 Balanza analítica de precisión 0,1 mg.

6.5 Pipetas aforadas de 5 - 100 mL.

6.6 Erlenmeyers de 100 - 125 mL.

6.7 Papel de filtro libre de ceniza.

6.8 Matraces aforados de 25 – 1 000 mL.

7. Reactivos

7.1 Ácido nítrico (HNO_3) 65 %, $d = 1,40 \text{ g/mL}$, ppa.

7.2 Ácido clorhídrico (HCl) 37 %, ppa.

7.3 Solución estándar de calcio de 1 000 mg/L:

agregar a 2,4980 g de carbonato de calcio (CaCO_3 , ppa para Absorción Atómica, secado a 180°C durante 1 hora) 100 mL de agua destilada, agregar gota a gota el mínimo volumen de HCl (aproximadamente 20 mL) hasta completa disolución del carbonato. Diluir a 1L en matraz aforado, con agua destilada. Almacenar en frasco de plástico. Es estable por un año.

Pueden usarse soluciones estándar para Absorción Atómica comerciales.

7.4 Solución de óxido de lantano 50 000 mg/L (La_2O_3 , ppa):

Disolver 58,65 g de La_2O_3 en 250 mL de HCl . Agregar el ácido lentamente hasta que el material es disuelto y diluir a 1L con agua destilada.

7.5 Agua destilada.

8. Procedimiento

8.1 Digestión de la muestra

a) Homogeneizar la muestra. Si se dispone de una estimación del contenido total de calcio en la muestra realizar una toma con pipeta aforada tal que la solución final esté en el rango de medida. La toma mínima a realizar será de 5,00 mL, en el caso de muestras muy concentradas diluirlas luego de la digestión. En el caso de estimar un contenido de calcio menor a 0,1 mg/L, y de ser necesario, concentrar la muestra durante la digestión.

Transferir la toma a un erlenmeyer de 100 - 125 mL.

Paralelamente se realiza un blanco de digestión sustituyendo la muestra por agua destilada.

b) Agregar 5 mL de HNO_3 .

Calentar en una plancha calefactora tal que se obtenga una ebullición leve, concentrar al menor volumen tal que no ocurra precipitación. Si es necesario agregar más ácido y seguir calentando hasta obtener una solución clara. No permitir que la solución se seque durante el calentamiento.

Puede quedar un pequeño precipitado no soluble en agua que es luego filtrado.

En caso de que la digestión con HNO_3 no sea suficiente, usar mezcla de ácidos (clorhídrico). En este caso la medida se realizará por adiciones estándar.

c) Lavar el erlenmeyer con agua, si es necesario filtrar con papel de filtro lavando abundantemente el precipitado, y recoger el filtrado en un matraz aforado.

Dejar enfriar a temperatura ambiente y llevar a volumen con agua destilada, homogeneizar.

d) Agregar solución de óxido de lantano (7.4), tal que su concentración final sea del 0,5 %.

8.2 Curva de calibración

Preparar soluciones estándar entre 0,1 y 20,0 mg/L de calcio a partir de la solución 7.3, con el agregado de HNO_3 tal que su concentración final sea del 1 %. Agregar también solución de óxido de lantano 5 % (7.4) tal que su concentración final sea del 0,5 %.

8.3 Determinación directa

a) Parámetros instrumentales:

Lámpara de cátodo hueco de calcio

Longitud de onda: 422,8 nm

Combustible: acetileno

Oxidante: aire

Tipo de llama: oxidante

b) Realizar la curva de calibración con los estándares de 0,1 a 20,0 mg/L.

c) Medir las muestras y blancos.

8.4 Determinación por adiciones estándar

a) Parámetros instrumentales:

Lámpara de cátodo hueco de calcio

Longitud de onda: 422,8 nm

Combustible: acetileno

Oxidante: aire

Tipo de llama: oxidante

- b) Realizar una medida aproximada del contenido de calcio en la muestra (x).
- c) Tomar 4 alícuotas iguales de la muestra con pipeta aforada en matraces aforados: A, B, C y D. Agregar a cada una solución de óxido de lantano (7.5) tal que su concentración final sea del 0,5 %. En el matraz A aforar con agua destilada. Realizar en los 3 matraces restantes adiciones de solución estándar de calcio tal que la concentración en el matraz B sea el doble que la concentración en A; en el matraz C el triple y en el D cuatro veces la concentración de A. Tener en cuenta que la suma del contenido de calcio de la muestra más la adición no supere los 20,0 mg/L.

9. Cálculos y expresión de los resultados

9.1 Se determina los límites de cuantificación (LC) y detección (LDM). Ver Norma técnica BII01.

9.2 Se determina la concentración de calcio en la digestión de la muestra y blanco (C_M y C_B) o en una dilución de los mismos a partir de la curva de calibración obtenida en 8.1, o a partir de la curva de adición obtenida en 8.2.

9.3 Si C_M es menor a LDM informar:

No detectable:

$$\text{Límite de detección} = LDM \cdot FC, \text{ expresado en mg/L.} \quad A.1$$

Donde:

FC es el factor de concentración de la muestra, obtenido según:

$$FC = \frac{V}{T} \quad A.2$$

Donde:

V = volumen del matraz aforado usado para recoger el filtrado de digestión en mL.

T = toma de la muestra en mL

9.4 Si C_M es mayor a LDM, pero menor a LC informar:

Se detecta:

$$Ca \text{ (mg/L)} < LC \cdot FC. \quad A.3$$

Donde:

FC es el factor de concentración de la muestra, obtenido como en 9.3.

9.5 Si C_M es mayor a LC informar el valor obtenido según:

$$Ca \left(\frac{mg}{L} \right) = (C_M \cdot FDM - C_B \cdot FDB) \cdot FC \quad (1) \quad A.4$$

Donde:

C_M = concentración de Ca en la digestión de la muestra en mg/L

FD_M = factor de dilución de la muestra

C_B = concentración de Ca en la digestión del blanco en mg/L

FD_B = factor de dilución del blanco.

FC = factor de concentración de la muestra, obtenido como en 9.3

A 14.3 Determinación de Magnesio Total

Método de Espectrofotometría de Absorción Atómica por Llama

1. Objetivo

Esta normativa técnica se usa para determinar magnesio en aguas y efluentes industriales en el rango de 0,02 a 1,0 mg/L*, es posible determinar mayores o menores concentraciones por dilución o concentración de la muestra respectivamente.

2. Referencias

2.1 Norma técnica N.º IIB01: Determinación del límite de detección y de cuantificación en Espectrofotometría de Absorción Atómica.

3. Principio

La muestra es digerida para reducir la interferencia por materia orgánica y convertir todo el metal a una forma libre determinable por Espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA) a 285,2 nm.

El contenido de magnesio se determina mediante una curva de calibración.

Para muestras de agua con bajo contenido de sólidos en suspensión con una turbidez menor a 1 NTU no es necesario realizar la digestión (punto 8.1).

4. Interferencias

La sensibilidad del magnesio se ve disminuida por la presencia de elementos que puedan formar oxisales estables como fósforo, aluminio. Para disminuir este efecto se agrega solución de lantano al 0,5 %.

5. Muestreo y Preservación

Recolectar en frasco de polietileno de alta densidad de 1L de capacidad de cierre hermético.

Ajustar a $pH < 2$ con ácido nítrico (6.1). Analizar antes de 6 meses.

6. Equipos y Materiales

6.1 Espectrofotómetro de absorción atómica con llama.

6.2 Plancha calefactora.

6.3 Balanza analítica de precisión 10 mg.

6.4 Pipetas aforadas de 5 - 100 mL.

6.5 Erlenmeyer de 100 - 125 mL.

6.6 Papel de filtro libre de ceniza.

6.7 Matraces aforados de 25 - 100 mL.

7. Reactivos

7.1 Ácido nítrico (HNO_3) 65 %, $d= 1,40$ g/mL reactivo A.C.S.

7.2 Ácido clorhídrico (HCl) 37 %, reactivo A.C.S.

7.3 Solución estándar de magnesio de 1 000 mg/L:

Agregar a 1,6580 g de óxido de magnesio (MgO estándar primario, reactivo A.C.S.) agua destilada para humedecer, agregar la mínima cantidad de HNO_3 para disolver el óxido. Diluir, en matraz aforado, a 1L con agua destilada. Almacenar en frasco de plástico. Es estable por un año.

Pueden usarse soluciones estándar para Absorción Atómica comerciales.

7.4 Solución de óxido de lantano 50 000 mg/L (La_2O_3):

Disolver 58,65 g de La_2O_3 en 250 mL de HCl . Agregar el ácido lentamente hasta disolución del material y diluir a 1 000 mL con agua.

7.5 Agua destilada.

8. Procedimiento

8.1 Digestión de la muestra

a) Homogeneizar la muestra. Si se dispone de una estimación del contenido total de magnesio en la muestra realizar una toma con pipeta aforada tal que la solución final esté en el rango de medida. La toma mínima a realizar será de 5,00 mL, en el caso de muestras muy concentradas diluirlas luego de la digestión. En el caso de estimar un contenido de magnesio menor a 0,02 mg/L, y de ser necesario, concentrar la muestra durante la digestión.

Transferir la toma a un Erlenmeyer de 100 - 125 mL.

Paralelamente se realiza un blanco de digestión sustituyendo la muestra por agua destilada.

b) Agregar 5 mL de HNO_3 . Calentar en una plancha calefactora tal que se obtenga una ebullición leve, concentrar al menor volumen tal que no ocurra precipitación. Si es necesario agregar más ácido y seguir calentando hasta obtener una solución clara. No permitir que la solución se seque durante el calentamiento.

Puede quedar un pequeño precipitado no soluble en agua que es luego filtrado.

En caso de que la digestión con HNO_3 no sea suficiente, usar mezcla de ácidos (clorhídrico). En este caso la medida se realizará por adiciones estándar.

c) Lavar el erlenmeyer con agua, si es necesario filtrar con papel de filtro lavando abundantemente el precipitado, y recoger el filtrado en un matraz aforado.

Dejar enfriar a temperatura ambiente y llevar a volumen con agua destilada, homogeneizar.

8.2 Curva de calibración

Preparar soluciones estándar de 0,02; 0,05; 0,1; 0,25; 0,5 y 1,0 mg/L de magnesio a partir de la solución 7.3, con el agregado de HNO₃ tal que su concentración final sea del 1%. Agregar también solución de óxido de lantano 5% (7.4) tal que su concentración final sea del 0,5 %.

8.3 Determinación directa

a) Parámetros instrumentales:

Lámpara de cátodo hueco de magnesio

Longitud de onda: 285,2 nm

Combustible: acetileno

Oxidante: aire

Tipo de llama: oxidante

b) Realizar la curva de calibración con los estándares de 0,02 a 1,0 mg/L.

c) Medir las muestras y blancos.

8.4 Determinación por adiciones estándar

a) Parámetros instrumentales:

Lámpara de cátodo hueco de magnesio

Longitud de onda: 285,2 nm

Combustible: acetileno

Oxidante: aire

Tipo de llama: oxidante

b) Realizar una medida aproximada del contenido de magnesio en la muestra (x).

c) Tomar 4 alícuotas iguales de la muestra con pipeta aforada en matraces aforados: A, B, C y D. Agregar a cada una solución de óxido de lantano (7.4) tal que su concentración final sea del 0,5 %. En el matraz A aforar con agua destilada. Realizar en los tres matraces restantes adiciones de solución estándar de magnesio tal que la concentración en el matraz B sea el doble que la concentración en A; en el matraz C el triple y en el D cuatro veces la concentración de A. Tener en cuenta que la suma del contenido de magnesio de la muestra más la adición no supere los 1,0 mg/L.

9. Cálculos y expresión de los resultados

9.1 Se determina los límites de cuantificación (LC) y detección (LDM) con estándares de 0,005 y 0,01 mg/L. Ver Norma técnica BII01.

9.2 Se determina la concentración de magnesio en la digestión de la muestra y blanco (C_M y C_B) o en una dilución de los mismos a partir de la curva de calibración obtenida en 8.1, o a partir de la curva de adición obtenida en 8.2.

9.3 Si C_M es menor a LDM informar:

No detectable:

$$\text{Límite de detección} = LDM \cdot FC, \text{ expresado en mg/L.} \quad A.5$$

Donde:

FC es el factor de concentración de la muestra, obtenido según:

$$FC = \frac{V}{T} \quad A.6$$

Donde:

V = volumen del matraz aforado usado para recoger el filtrado de digestión en mL.

T = toma de la muestra en mL.

9.4 Si C_M es mayor a LDM, pero menor a LC informar:

Se detecta:

$$Mg \text{ (mg/L)} < LC \cdot FC. \quad A.7$$

Donde:

FC es el factor de concentración de la muestra, obtenido como en 9.3.

9.5 Si C_M es mayor a LC informar el valor obtenido según:

$$Mg \text{ (mg/L)} = (C_M \cdot FDM - C_B \cdot FDB) \cdot FC \quad A.8$$

Donde:

C_M = concentración de Mg en la digestión de la muestra en mg/L

FDM = factor de dilución de la muestra

C_B = concentración de Mg en la digestión del blanco en mg/L

FDB = factor de dilución del blanco.

FC = factor de concentración de la muestra, obtenido como en 8.3

A 14.4 Determinación de Potasio Total

Método de Espectrofotometría de Absorción Atómica por Llama

1. Objetivo

Esta normativa técnica se usa para determinar potasio en aguas y efluentes industriales en el rango de 0,05 a 4,0 mg/L*, es posible determinar mayores o menores concentraciones por dilución o concentración de la muestra respectivamente.

2. Referencias

2.1 Norma técnica IIB01: Determinación del límite de detección y de cuantificación en Espectrofotometría de Absorción Atómica.

3. Principio

La muestra es digerida para reducir la interferencia por materia orgánica y convertir todo el metal a una forma libre determinable por Espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA) a 769,9 nm. El contenido de potasio se determina mediante una curva de calibración.

Para muestras de agua con bajo contenido de sólidos en suspensión con una turbidez menor a 1NTU no es necesario realizar la digestión (punto 8.1).

4. Interferencias

Para evitar la ionización se agrega como buffer de ionización, solución de cloruro de cesio al 1 %.

5. Muestreo y Preservación

Recolectar en frasco de polietileno de alta densidad de 1 L de capacidad de cierre hermético. Ajustar a pH < 2 con ácido nítrico (7.1). Analizar antes de 6 meses.

6. Equipos y Materiales

6.1 Espectrofotómetro de absorción atómica con llama.

6.2 Plancha calefactora.

6.3 Balanza analítica de precisión 10 mg.

6.4 Balanza analítica de precisión 0,1 mg.

6.5 Pipetas aforadas de 5 - 100 mL.

6.6 Erlenmeyer de 100 - 125 mL.

6.7 Papel de filtro libre de ceniza.

6.8 Matraces aforados de 25 – 1 000 mL.

7. Reactivos

7.1 Ácido nítrico (HNO₃) 65 %, d= 1,40 g/mL, ppa.

7.2 Ácido clorhídrico (HCl) 37 %, ppa.

7.3 Ácido sulfúrico (H₂SO₄) 95-98 % w/V, ppa.

7.4 Solución estándar de potasio de 1 000 mg/L:

Disolver 1,9070 g de cloruro de potasio en agua. Diluir a 1 L en matraz aforado, con HNO_3 .

Almacenar en frasco de plástico. Es estable por un año.

Pueden usarse soluciones estándar para Absorción Atómica comerciales.

7.5 Solución de cloruro de cesio 10 % (CsCl):

Disolver 12,67 g de CsCl (ppa para Absorción Atómica) en 1 L de agua.

7.6 Agua destilada.

8. Procedimiento

8.1 Digestión de la muestra

a) Homogeneizar la muestra. Si se dispone de una estimación del contenido total de potasio en la muestra realizar una toma con pipeta aforada tal que la solución final esté en el rango de medida. La toma mínima a realizar será de 5,00 mL, en el caso de muestras muy concentradas diluirlas luego de la digestión. En el caso de estimar un contenido de potasio menor a 0,05 mg/L, y de ser necesario, concentrar la muestra durante la digestión.

Transferir la toma a un Erlenmeyer de 100 - 125 mL.

Paralelamente se realiza un blanco de digestión sustituyendo la muestra por agua destilada.

b) Agregar 5 mL de HNO_3 . Calentar en una plancha calefactora tal que se obtenga una ebullición leve, concentrar al menor volumen tal que no ocurra precipitación. Si es necesario agregar más ácido y seguir calentando hasta obtener una solución clara. No permitir que la solución se seque durante el calentamiento.

Puede quedar un pequeño precipitado no soluble en agua que es luego filtrado.

En caso de que la digestión con HNO_3 no sea suficiente, usar mezcla de ácidos (clorhídrico y/o sulfúrico). En este caso la medida se realizará por adiciones estándar.

c) Lavar el erlenmeyer con agua, si es necesario filtrar con papel de filtro lavando abundantemente el precipitado, y recoger el filtrado en un matraz aforado.

Dejar enfriar a temperatura ambiente y llevar a volumen con agua destilada, homogeneizar.

d) Agregar solución de cloruro de cesio (6.5) (antes de llevar a volumen en 7.1.c o a una alícuota de la solución obtenida en ese punto), tal que su concentración final sea del 1 %.

8.2 Curva de calibración

Preparar soluciones estándar entre 0,05 y 4,0 mg/L de potasio a partir de la solución 7.4, con el agregado de HNO_3 tal que su concentración final sea del 1%. Agregar también solución de cloruro de cesio 10 % (7.5) tal que su concentración final sea del 1 %.

8.3 Determinación directa

a) Parámetros instrumentales:

Lámpara de cátodo hueco de potasio

Longitud de onda: 769,9 nm

Combustible: acetileno

Oxidante: aire

Tipo de llama: oxidante

b) Realizar la curva de calibración con los estándares de 0,05 a 4,0 mg/L.

c) Medir las muestras y blancos.

8.4 Determinación por adiciones estándar

a) Parámetros instrumentales:

Lámpara de cátodo hueco de potasio

Longitud de onda: 769,9 nm

Combustible: acetileno

Oxidante: aire

Tipo de llama: oxidante

b) Realizar una medida aproximada del contenido de potasio en la muestra (x).

c) Tomar 4 alícuotas iguales de la muestra con pipeta aforada en matraces aforados.: A, B, C y D.

Agregar a cada una solución de cloruro de cesio (6.5) tal que su concentración final sea del 1 %.

En el matraz A aforar con agua destilada. Realizar en los tres matraces restantes adiciones de solución estándar de potasio tal que la concentración en el matraz B sea el doble que la concentración en A; en el matraz C el triple y en el D cuatro veces la concentración de A. Tener en cuenta que la suma del contenido de potasio de la muestra más la adición no supere los 4,0 mg/L.

9. Cálculos y expresión de los resultados

9.1 Se determina los límites de cuantificación (LC) y detección (LDM).

9.2 Se determina la concentración de potasio en la digestión de la muestra y blanco (C_M y C_B) o en una dilución de los mismos a partir de la curva de calibración obtenida en 7.1, o a partir de la curva de adición obtenida en 7.2.

9.3 Si C_M es menor a LDM informar:

No detectable:

Límite de detección = $LDM \cdot FC$, expresado en mg/L.

A.9

Donde:

FC es el factor de concentración de la muestra, obtenido según:

$$FC = \frac{V}{T} \quad \text{A.10}$$

Donde:

V = volumen del matraz aforado usado para recoger el filtrado de digestión en mL.

T = toma de la muestra en mL.

9.4 Si C_M es mayor a LDM, pero menor a LC informar:

Se detecta:

$$K (mg/L) < LC \cdot FC. \quad \text{A.11}$$

Donde:

FC es el factor de concentración de la muestra, obtenido como en 9.3.

9.5 Si C_M es mayor a LC informar el valor obtenido según:

$$K (mg/L) = (C_M \cdot FDM - C_B \cdot FDB) \cdot FC \quad \text{A.12}$$

Donde:

C_M = concentración de K en la digestión de la muestra en mg/L

FDM = factor de dilución de la muestra

C_B = concentración de K en la digestión del blanco en mg/L

FDB = factor de dilución del blanco.

FC = factor de concentración de la muestra, obtenido como en 9.3

A 14.5 Determinación de Sodio Total

Método de Espectrofotometría de Absorción Atómica por Llama

1. Objetivo

Esta normativa técnica se usa para determinar sodio en aguas y efluentes industriales en el rango de 0,02 a 1,0 mg/L*, es posible determinar mayores o menores concentraciones por dilución o concentración de la muestra respectivamente.

2. Referencias

2.1 Norma técnica IIB01: Determinación del límite de detección y de cuantificación en Espectrofotometría de Absorción Atómica.

3. Principio

La muestra es digerida para reducir la interferencia por materia orgánica y convertir todo el metal a una forma libre determinable por Espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA) a 589,0 nm.

El contenido de sodio se determina mediante una curva de calibración.

Para muestras de agua con bajo contenido de sólidos en suspensión con una turbidez menor a 1NTU no es necesario realizar la digestión (punto 8.1).

4. Interferencias

Para evitar la ionización se agrega como buffer de ionización, solución de cloruro de cesio al 1 %.

5. Muestreo y Preservación

Recolectar en frasco de polietileno de alta densidad de 1 L de capacidad de cierre hermético. Ajustar a $\text{pH} < 2$ con ácido nítrico (7.1).

6. Equipos y Materiales

6.1 Espectrofotómetro de absorción atómica con llama.

6.2 Plancha calefactora.

6.3 Balanza analítica de precisión 10 mg.

6.4 Balanza analítica de precisión 0,1 mg.

6.5 Pipetas aforadas de 5 - 100 mL.

6.6 Erlenmeyer de 100 - 125 mL.

6.7 Papel de filtro libre de ceniza.

6.8 Matraces aforados de 25 – 1 000 mL.

7. Reactivos

7.1 Ácido nítrico (HNO_3) 65 %, $d = 1,40 \text{ g/mL}$, ppa.

7.2 Ácido clorhídrico (HCl) 37 %, ppa.

7.3 Ácido sulfúrico (H_2SO_4) 95-98 % w/V, ppa.

7.4 Solución estándar de sodio de 1 000 mg/L:

Disolver 2,5420 g de cloruro de sodio en agua. Diluir a 1 L en matraz aforado, con HNO_3 .

Almacenar en frasco de plástico. Es estable por un año.

Pueden usarse soluciones estándar para Absorción Atómica comerciales.

7.5 Solución de cloruro de cesio al 10 %:

Disolver 12,67 g de cloruro de cesio (ppa para Absorción Atómica) en 1 L de agua.

7.6 Agua destilada.

8. Procedimiento

8.1 Digestión de la muestra

a) Homogeneizar la muestra. Si se dispone de una estimación del contenido total de sodio en la muestra realizar una toma con pipeta aforada tal que la solución final esté en el rango de medida. La toma mínima a realizar será de 5,00 mL, en el caso de muestras muy concentradas diluirlas luego de la digestión.

Transferir la toma a un erlenmeyer de 100 - 125 mL.

Paralelamente se realiza un blanco de digestión sustituyendo la muestra por agua destilada.

b) Agregar 5 mL de HNO_3 . Calentar en una plancha calefactora tal que se obtenga una ebullición leve, concentrar al menor volumen tal que no ocurra precipitación. Si es necesario agregar más ácido y seguir calentando hasta obtener una solución clara. No permitir que la solución se seque durante el calentamiento.

Puede quedar un pequeño precipitado no soluble en agua que es luego filtrado.

En caso de que la digestión con HNO_3 no sea suficiente, usar mezcla de ácidos (clorhídrico y/o sulfúrico). En este caso la medida se realizará por adiciones estándar.

c) Lavar el Erlenmeyer con agua, si es necesario filtrar con papel de filtro lavando abundantemente el precipitado, y recoger el filtrado en un matraz aforado.

Dejar enfriar a temperatura ambiente y llevar a volumen con agua destilada, homogeneizar.

d) Agregar solución de cloruro de cesio (7.5), tal que su concentración final sea del 1 %.

8.2 Curva de calibración

Preparar soluciones estándar entre 0,02 y 1,0 mg/L de sodio a partir de la solución 7.4, con el agregado de HNO_3 tal que su concentración final sea del 1 %. Agregar también solución de cloruro de cesio 10 % (7.5) tal que su concentración final sea del 1 %.

8.3 Determinación directa

a) Parámetros instrumentales:

Lámpara de cátodo hueco de sodio

Longitud de onda: 589,0 nm

Combustible: acetileno

Oxidante: aire

Tipo de llama: oxidante

b) Realizar la curva de calibración con los estándares de 0,02 a 1,0 mg/L.

c) Medir las muestras y blancos.

8.4 Determinación por adiciones estándar

a) Parámetros instrumentales:

Lámpara de cátodo hueco de sodio

Longitud de onda: 589,0 nm

Combustible: acetileno

Oxidante: aire

Tipo de llama: oxidante

b) Realizar una medida aproximada del contenido de sodio en la muestra (x).

c) Tomar 4 alícuotas iguales de la muestra con pipeta aforada en matraces aforados: A, B, C y D. Agregar a cada una solución de cloruro de cesio (7.5) tal que su concentración final sea del 1 %. En el matraz A aforar con agua destilada. Realizar en los tres matraces restantes adiciones de solución estándar de sodio tal que la concentración en el matraz B sea el doble que la concentración en A; en el matraz C el triple y en el D cuatro veces la concentración de A.

Tener en cuenta que la suma del contenido de sodio de la muestra más la adicción no supere los 1,0 mg/L.

9. Cálculos y expresión de los resultados

9.1 Se determina los límites de cuantificación (LC) y detección (LDM).

9.2 Se determina la concentración de sodio en la digestión de la muestra y blanco (C_M y C_B) o en una dilución de los mismos a partir de la curva de calibración obtenida en 8.1, o a partir de la curva de adición obtenida en 8.2.

9.3 Si C_M es menor a LDM informar:

No detectable:

$$\text{Límite de detección} = LDM \cdot FC. \quad A.13$$

Donde:

FC es el factor de concentración de la muestra, obtenido según:

$$FC = \frac{V}{T} \quad A.14$$

Donde:

V = volumen del matraz aforado usado para recoger el filtrado de digestión en mL.

T = toma de la muestra en mL.

9.4 Si C_M es mayor a LDM, pero menor a LC informar:

Se detecta:

$$Na \text{ (mg/L)} < LC \cdot FC. \quad A.15$$

Donde:

FC es el factor de concentración de la muestra, obtenido como en 9.3.

9.5 Si C_M es mayor a LC informar el valor obtenido según:

$$Na \text{ (mg/L)} = (C_M \cdot F_{DM} - C_B \cdot F_{DB}) \cdot FC \quad A.16$$

Donde:

C_M = concentración de Na en la digestión de la muestra en mg/L

F_{DM} = factor de dilución de la muestra

C_B = concentración de Na en la digestión del blanco en mg/L

F_{DB} = factor de dilución del blanco

FC = factor de concentración de la muestra, obtenido como en 8.3

A 14.6 Determinación de cloruros

Método argentométrico

1. Objetivo

Esta normativa técnica se utiliza para la determinación del ión cloruro en aguas limpias que contengan concentraciones de cloruro entre 1,5 y 100 mg/L. Se podrán determinar concentraciones mayores por dilución de muestra.

2. Principio del método

El cloruro se determina en una solución neutra o ligeramente alcalina por titulación con nitrato de plata estándar, usando cromato de potasio como indicador del punto final. El cloruro de plata es cuantitativamente precipitado antes de que sea formado el cromato de plata de color rojo.

3. Interferencias

Sustancias en cantidades normalmente encontradas en aguas no interfieren.

3.1 Los iones bromuros, ioduros y cianuros son medidos como equivalentes de la concentración de cloruros.

3.2 Los iones sulfuros, tiosulfatos y sulfitos afectan la determinación, pero pueden ser eliminados por tratamiento con peróxido.

3.3 Ortofosfato en concentraciones mayores a 25 mg/L, produce precipitados de fosfato de plata.

3.4 Hierro en concentraciones mayores a 10 mg/L, enmascara el punto final de la titulación.

4. Muestreo y preservación

Recolectar la muestra en frascos de plástico o vidrio. No es necesario el agregado de preservante.

5. Materiales

5.1 Buretas de 2, 10 y 25 mL

5.2 Erlenmeyer de 250 mL

5.3 Pipetas aforadas de 100 mL

5.4 Pipetas graduadas de 1 y 5 mL

5.5 Matraz aforado de 1 000 mL

6. Reactivos

6.1 Solución estándar de nitrato de plata 0,0141 N: disolver 2,395 g de nitrato de plata (AgNO_3) en agua destilada y diluir a 1 000 mL. Guardar en frasco color ámbar y estandarizar contra la solución de cloruro de sodio (6.2).

6.2 Solución estándar de cloruro de sodio 0,0141 N: secar aproximadamente entre 1 y 2 g de cloruro sodio (NaCl) a 140 °C. Pesar exactamente 824,0 mg de NaCl , disolver en agua destilada y diluir en matraz aforado de 1 000 mL.

6.3 Reactivo indicador de cromato de potasio: disolver 50 g de cromato de potasio en agua destilada. Agregar solución de nitrato de plata, gota a gota hasta producir un ligero precipitado rojo de cromato de plata. Dejar reposar durante 12 h, filtrar y diluir a 1 000 mL con agua destilada.

6.4 Suspensión de hidróxido de aluminio: disolver 125 g de sulfato de aluminio y potasio dodecahidratado ($\text{AlK}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) en 1 L de agua destilada. Calentar a 60 °C y agregar agitando 55 mL de hidróxido de amonio concentrado (NH_4OH). Dejar reposar 1 hora, transferir a un vaso grande, y lavar el precipitado a través de adiciones sucesivas, mezclando y decantando, hasta que el agua de lavado se encuentre libre de cloruros. Recién preparada la suspensión ocupa un volumen de aproximadamente 1 L.

6.5 Reactivo indicador de fenolftaleína: solución alcohólica al 5 %.

6.6 Solución de hidróxido de sodio 1 N.

6.7 Solución de ácido sulfúrico 1 N.

6.8 Peróxido de hidrógeno al 30 %.

7. Procedimiento

7.1 Titulación de la solución estándar de nitrato de plata

a) Tomar en un erlenmeyer de 250 mL, 20 mL de la solución estándar de cloruro de sodio (6.2). Diluir a 100 mL. Agregar 1 mL de solución indicadora. Valorar la solución de nitrato de plata hasta un punto final de color amarillo rosado. Valorar diariamente.

7.2 Determinación

a) Tomar en un erlenmeyer de 250 mL, 100 mL de muestra o una alícuota diluida a 100 mL.

Si la muestra es altamente coloreada, agregar 3 mL de suspensión de hidróxido de aluminio, mezclar, sedimentar y filtrar.

Si existe presencia de sulfuro, sulfito o tiosulfato, agregar 1 mL de peróxido de hidrógeno y calentar por un minuto.

Ajustar la muestra a pH entre 7 y 10 con ácido sulfúrico o hidróxido de sodio.

b) Agregar 1 mL de solución indicadora. Titular con solución estándar de nitrato de plata (6.1), hasta color amarillo rosado como punto final. Titular siempre un blanco de agua destilada, en las mismas condiciones.

8. Cálculos y expresión de resultados

$$N = \frac{(P \cdot V)}{(58,5 \cdot G)} \quad \text{A.17}$$

Donde:

N: normalidad del nitrato de plata.

P: masa de NaCl pesado para la preparación de la solución estándar de cloruro de sodio.

V: volumen de la solución estándar de NaCl tomado para la valoración de la solución de nitrato de plata, 20 mL.

G: gasto de nitrato de plata en su valoración.

$$\text{Cloruro, mg/L} = \frac{(((A-B) \cdot N \cdot 35450))}{v} \quad \text{A.18}$$

Donde:

A: gasto de titulante en la valoración de la muestra, mL.

B: gasto de titulante por el blanco, mL.

V: volumen de muestra tomado para el ensayo, mL.

A 14.7 Determinación de nitratos

Método de espectrofotometría ultravioleta

1. Objetivo

Esta normativa técnica se utiliza para una estimación rápida de la concentración de nitratos en muestras con bajos contenidos en materia orgánica, como en aguas naturales no contaminadas y en agua potable.

2. Principio

Los nitratos absorben la radiación ultravioleta a la longitud de onda de 220 nm. La materia orgánica también absorbe a 220 nm, por consiguiente, es necesario realizar la corrección de la

absorbancia midiendo a 275 nm donde los nitratos no absorben. La concentración de nitrato se determina mediante una curva de calibración.

3. Interferencias

3.1 La materia orgánica disuelta, los surfactantes, nitritos, cromo presentan interferencias al método.

3.2 Los aniones clorito y clorato afectan la medida, aunque no es común que estén presentes en aguas naturales.

4. Muestreo y preservación

Recolectar la muestra en envases de vidrio de un volumen mínimo de 200 mL, sin cámara de aire y cerrar herméticamente. Analizar tan pronto como sea posible.

Si no es posible analizar antes de 24 h de recolectada la muestra ajustar a $\text{pH} < 2$ con ácido clorhídrico o sulfúrico y refrigerar a 4 °C.

5. Equipos y materiales

5.1 Espectrofotómetro con lámpara UV, a longitud de onda de 220 nm y 275 nm.

5.2 Matraz aforado de 100 mL y 1 L.

5.3 Pipeta aforada de 10 mL.

6. Reactivos

6.1 Ácido clorhídrico.

6.2 Agua destilada.

6.3 Solución stock de nitrato de potasio, 100 mg de NO_3^- : secar el nitrato de potasio a 105°C durante 24 h. Disolver 0,7218 g en agua destilada. Agregar 2 mL de cloroformo para preservar la solución y diluir a 1 000 mL en matraz aforado. Esta solución es estable por seis meses.

6.4 Solución intermedia de nitrato de potasio, 10 mg: diluir diez veces la solución stock de nitrato con agua destilada y agregar 2 mL de cloroformo. Esta solución es estable por seis meses.

7. Procedimiento

7.1 Curva de calibración:

a) Preparar soluciones estándares de nitrato en un rango entre 1 y 7 mg por dilución de la solución intermedia de nitrato (6.4).

b) Medir la absorbancia de los estándares a 220 y 275 nm contra un blanco de agua.

c) Graficar absorbancia corregida vs concentración de nitrato. Verificar la curva periódicamente.

7.2 Determinación:

La muestra debe ser clara, si es necesario filtrarla. Medir la absorbancia de la muestra a 220 y 275 nm contra un blanco de agua.

8. Cálculos y expresión de los resultados

La absorbancia corregida se calcula como:

$$Abs.nitratos = (Abs220 - Abs275) \quad A.19$$

Si el valor corregido es mayor al 10 % de la lectura realizada a 220 nm, este método no debe ser aplicado.

La concentración de nitratos se obtiene con la curva de calibración y el valor de absorbancia corregido. Los resultados se expresan como mg/L de nitrato como nitrógeno

A 14.8 Determinación de sulfatos

Método turbidimétrico

1. Objetivo

Esta normativa técnica se utiliza para la determinación de sulfato en aguas en efluentes industriales y domésticos para concentraciones entre 1 y 40 mg/L.

2. Principio del método

El ión sulfato es precipitado en medio acético con cloruro de bario para formar cristales de sulfato de bario de tamaño uniforme. La absorción de luz producida por la suspensión del sulfato de bario se mide con un fotómetro y la concentración de sulfato es determinada por comparación con la lectura realizada en una curva estándar.

3. Interferencias

3.1 Material suspendido o color en grandes cantidades. Remover por filtración. Si las cantidades son bajas se puede corregir corriendo blancos en los cuales no es agregado el cloruro de bario.

3.2 Sílice en concentraciones mayores a 500 mg/L.

4. Muestreo y preservación

Recolectar la muestra en botellas de plástico o vidrio y mantenerla refrigerada a 4 °C como máximo durante 28 días.

5. Equipos y materiales

5.1 Fotómetro:

- a) Turbidímetro.
- b) Espectrofotómetro a longitud de onda de 420 nm con camino óptico 2,5 a 10 cm con la celda correspondiente.

c) Filtrofotómetro equipado con un filtro violeta con el máximo de transmitancia cercano a los 420 nm. y paso de luz de 2,5 a 10 cm.

5.2 Agitador magnético: usar velocidad de agitación constante.

5.3 Timer

5.4 Espátula

5.5 Matraz erlenmeyer de 500 mL

5.6 Pipetas aforadas de 20 y 100 mL

5.7 Matraz aforado de 1 000 mL

6. Reactivos

6.1 Solución buffer A: disolver 30 g de cloruro de magnesio, 5 g de acetato de sodio, 1g de nitrato de potasio y 20 mL de ácido acético, en 500 mL de agua destilada. Llevar a 1 000 mL.

6.2 Solución buffer B (necesario cuando la concentración de sulfato de la muestra es menor a 10 mg/L): disolver 30 g de cloruro de magnesio, 5 g de acetato de sodio trihidratado, 1g de nitrato de potasio, 0,111 g de sulfato de sodio y 20 mL de ácido acético, en 500 mL de agua destilada. Llevar a 1 000 mL.

6.3 Cristales de cloruro de bario.

6.4 Solución estándar de sulfato 100 mg/L: disolver 0,1479 g sulfato de sodio anhidro, en agua destilada y llevar a 1 000 mL en matraz aforado.

7. Procedimiento

7.1 Curva de calibración:

a) Realizar una curva de calibración con concentraciones que contengan entre uno y 10mg/L o entre 10 y 40 mg/L de sulfato a partir de la solución estándar de sulfato, para que la curva contenga la concentración de la muestra.

b) Pipetear 100,0 mL de una solución estándar en un matraz erlenmeyer de 250 mL. Agregar 20,0 mL de solución buffer A para soluciones de concentraciones mayores a 10mg/L, o 20,0 mL de buffer B para concentraciones menores a 10 mg/L.

c) Agregar una punta de espátula de cristales de $BaCl_2$ y agitar a velocidad constante durante 60 segundos.

Después de finalizada la agitación, colocar la solución en la celda y medir la absorbancia a los 5 min, a 420 nm.

d) Repetir los pasos descritos en los numerales 7.1 b) y c) para los demás estándares. Realizar un blanco de agua destilada y reactivos.

e) Graficar absorbancia vs mg SO⁴/L.

7.2 Determinación:

a) Tomar 100,0 mL de la muestra o una alícuota diluida a 100,0 mL en un matraz erlenmeyer de 250 mL. Agregar 20,0 mL de solución buffer A cuando se estime que la concentración de sulfato es mayor a 10 mg/L, o 20,0 mL de solución buffer B si se estima que la concentración de sulfato es menor a 10mg/L.

b) Seguir los pasos descritos en el numeral 7.1 c).

c) Si la muestra posee color y/o turbidez medir la absorbancia de la muestra (blanco de muestra).

8. Cálculos y expresión de resultados

8.1 Medida con buffer A

$$\text{Sulfato, mg SO}_4 \text{ - /L} = \frac{(C \cdot 1\,000)}{V} \quad \text{A.20}$$

Donde:

C: mg/L de la muestra, determinado con la curva de calibración, usando como dato de absorbancia: (Abs.muestra - Abs. blanco de muestra)

V: mL de muestra tomados para la determinación

8.2 Medida con buffer.

$$\text{Sulfato, mg SO}_4 \text{ -/L} = \frac{(M-B) \cdot 1\,000}{V} \quad \text{A.21}$$

Donde:

M: mg/L aparente de la muestra leída de la curva de calibración

B: mg/L del blanco leído de la curva de calibración

V: mL de muestra tomados para la determinación

A 14.9 Determinación de conductividad

1. Objetivo

Esta normativa técnica se utiliza para la medida de conductividad en aguas y efluentes industriales.

2. Definiciones

La conductividad es la capacidad que posee una solución acuosa de conducir la corriente eléctrica, a 25 °C.

3. Principio

El método consiste en la medida directa de la conductividad utilizando una celda de conductividad previamente estandarizada con una solución de cloruro de potasio.

4. Muestreo y preservación

El análisis puede ser realizado tanto en campo como en el laboratorio. Si el análisis no es realizado durante las 24 horas de recolectada la muestra, ésta debe ser filtrada con un filtro de 0,45 micras y preservada a 4 °C hasta 28 días luego de su recolección. El filtro y el equipo de filtración deben ser enjuagados con agua destilada y desionizada, y previo a su uso, enjuagarlos con la muestra a filtrar.

5. Equipos y materiales

5.1 Medidor de conductividad.

5.2 Celda de conductividad.

5.3 Termómetro con precisión de 0,1 °C, en el rango de 20-30 °C, o sensor de temperatura en el equipo.

5.4 Matraz aforado de 1 L.

5.5 Vasos de bohemia.

6. Reactivos

6.1 Agua destilada y desionizada.

6.2 Solución estándar de KCl: disolver 0,7456 g de cloruro de potasio secado previamente 2 horas a 105 °C en agua destilada y diluir a 1 L en matraz aforado a 25 °C. Esta solución estándar de referencia tiene, a 25 °C, una conductividad de 1412 µmhos/cm.

7. Procedimiento

Es preferible que la medida sea realizada a 25 °C, en caso contrario se deben realizar las correcciones necesarias para la temperatura de trabajo y el resultado final debe ser informado a 25 °C.

7.1 Seguir las instrucciones del medidor de conductividad utilizado.

7.2 Determinación de la constante de la celda: Enjuagar la celda de conductividad con al menos tres porciones de la solución de cloruro de sodio. Ajustar la temperatura de la cuarta porción a 25 °C.

Si el medidor de conductividad lee resistencia (R) en ohms, medir la resistencia de esta cuarta porción y la temperatura. Calcular la constante de la celda, C, como:

$$C - 1 = 0,001412 RKCl[1 + 0,019(T - 25)] \quad A.22$$

Donde:

RKCl = resistencia medida en ohms.

T = temperatura en °C.

7.3 Medida de la conductividad:

Enjuagar la celda de conductividad con una o más porciones de la muestra a medir. Ubicar la celda en la muestra de tal manera que no queden retenidas burbujas de aire. Ajustar la temperatura de la muestra a 25 °C.

Medir la resistencia o la conductividad de la muestra.

8. Cálculos y expresión de resultados

8.1 Cuando se mide resistencia de la muestra, la conductividad a 25 °C es:

$$k, \mu\text{mhos}/\text{cm} = \frac{1\,000\,000 \cdot C}{R_m [1 + 0,019 (T - 25)]} \quad \text{A.23}$$

Donde:

k = conductividad

C = constante de la celda en cm^{-1}

Rm = resistencia medida de la muestra en ohms.

T = temperatura de medida en °C.

8.2 Cuando se mide conductividad de la muestra sin compensación de temperatura, la conductividad a 25 °C se calcula como:

$$k, \mu\text{mho}/\text{cm} = (km) / [1 + 0,0191(T - 25)] \quad \text{A.24}$$

Donde:

km = conductividad medida en $\mu\text{mho}/\text{cm}$ a T °C

T = temperatura de medida en °C.

8.3 Ciertos instrumentos poseen compensación de temperatura y leen la conductividad en unidades de $\mu\text{mho}/\text{cm}$, en dicho caso la lectura es corregida automáticamente a 25 °C, y se reporta directamente el valor medido.

A 14.10 Determinación de turbidez

Método Nefelométrico

1. Objetivo

Esta normativa técnica se utiliza para la determinación de la turbidez en aguas naturales y tratadas.

2. Definición

La turbidez es una medida de la propiedad óptica que causa dispersión y absorción de la luz con disminución de la transmisión en línea recta. Se miden en unidades de turbidez nefelométrica, (NTU).

3. Principio del método

Este método está basado en la comparación de la intensidad de la luz dispersada por la muestra en condiciones definidas con la luz dispersada por una suspensión estándar de referencia bajo las mismas condiciones. Cuanto mayor sea la intensidad de la luz dispersada, mayor será la turbidez.

4. Muestreo y preservación

Se debe realizar la determinación en el día en que se realiza el muestreo. De lo contrario, almacenar la muestra hasta 24 h en la oscuridad.

5. Equipos y materiales

5.1 Turbidímetro: es un nefelómetro con una fuente de luz para iluminar la muestra y uno o más detectores fotoeléctricos con mecanismo de lectura para indicar la intensidad de la luz dispersada a 90 ° del camino de luz incidente.

5.2 Tubos para la muestra: de vidrio transparente y limpios.

5.3 Matraces aforados de 100 mL.

5.4 Pipetas aforadas de 5 y 10 mL.

5.5 Balanza analítica de 1 mg de precisión.

6. Reactivos

6.1 Agua libre de turbidez: se obtiene pasando agua destilada a través de un filtro de membrana. Para todas las soluciones utilizar agua libre de turbidez.

6.2 Solución I: disolver 1,0 g de sulfato de hidrazina en agua destilada y diluir a 100 mL en matraz aforado.

6.3 Solución II: disolver 10,0 g de hexametilentetramina en agua destilada y diluir a 100 mL en matraz aforado. Preparar mensualmente.

6.4 Suspensión stock de turbidez, 400 NTU: en un matraz aforado de 100 mL mezclar 5,0 mL de solución I con 5,0 mL de solución II. Dejar reposar 24 h a 25 °C, luego enrasar y mezclar.

6.5 Suspensión estándar de turbidez, 40 NTU: diluir 10,0 mL de suspensión stock de turbidez en 100 mL con agua libre de turbidez en matraz aforado.

7. Procedimiento

a) Realizar la calibración del equipo de acuerdo al manual de instrucciones. Una vez calibrado con la solución de 40 NTU, proceder a las lecturas de turbidez de las diferentes muestras.

b) Si la turbidez de la muestra es mayor de 40 NTU diluir la muestra con agua libre de turbidez hasta que la turbidez caiga entre 30 - 40 NTU.

8. Expresión de resultados

La turbidez se informa en NTU (Unidades Nefelométricas de Turbidez)

$$Turbidez, NTU = \frac{A \cdot V}{T} \quad A.25$$

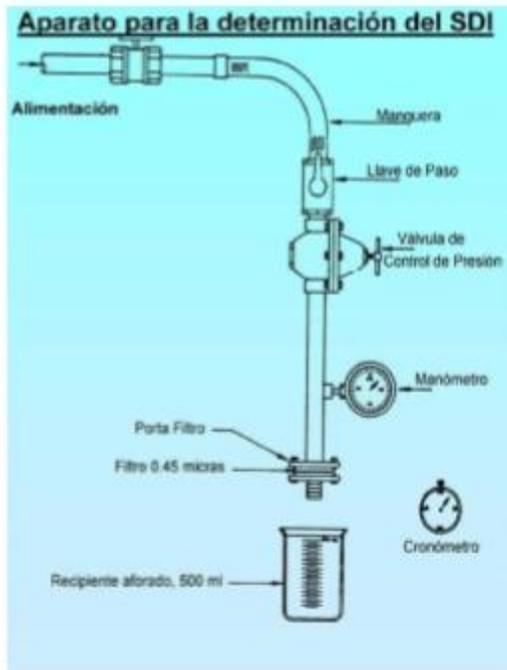
Donde:

A: NTU de la muestra diluida

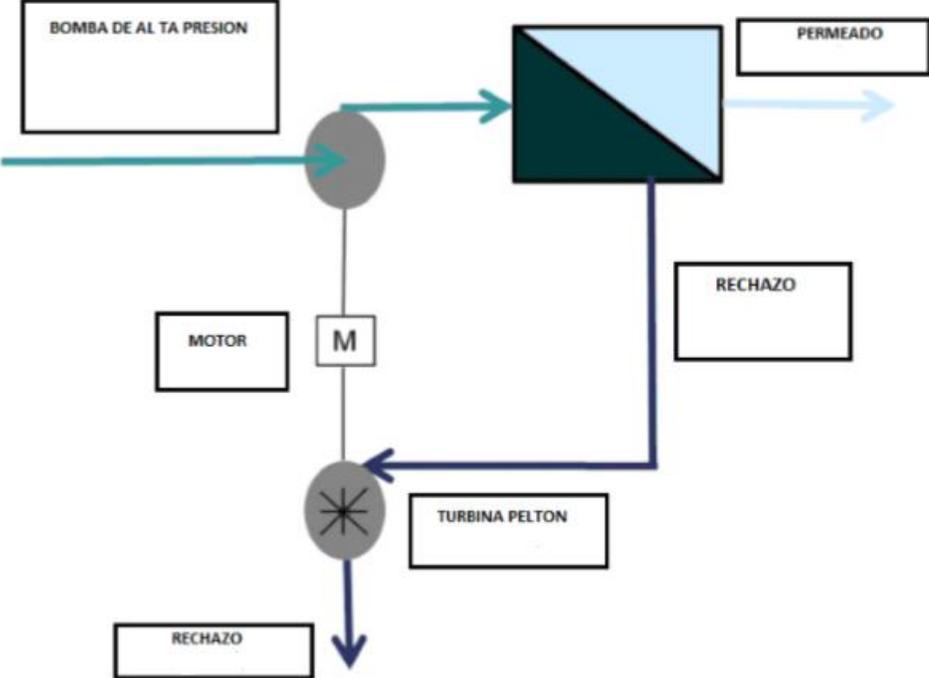
V: volumen del matraz de dilución, mL

T: volumen de muestra tomado para diluir, mL

Anexo 15: Aparato para la determinación del SDI



Anexo 16: Sistema de recuperación con Turbina Pelton



Anexo 17: Esquema de recuperación con intercambiadores de presión

