

**Evaluación de la eficiencia de la osmosis inversa en  
una planta de tratamiento de agua residual en la  
industria minera**

**Evaluation of the efficiency of reverse osmosis in a  
wastewater treatment plant in the mining  
industry.**



**Elaborado por**

Jersson Edir Hernández Delgado

**Tutores**

Javier Fernando De La Cruz Morales

**Título a obtener**

Magister En Ingeniería Química-Profundización

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de minas  
Departamento de Procesos y Energía.  
Sede Medellín  
Medellín, Antioquia  
2020

## RESUMEN

El agua usada en operaciones mineras puede llegar a contaminarse a niveles altos, es por esto que el tratamiento de estas aguas residuales ha llegado a ser un componente principal en esta industria. Dependiendo del tipo de agua tratar, uno de los principales sistemas usados para el tratamiento del agua es la osmosis inversa (RO), es por esto que en el presente trabajo se describe el proceso que se realizó para la instalación y puesta en marcha de unos sistemas de RO, con el objetivo de evaluar su eficiencia para tratar agua proveniente del proceso de extracción de oro, teniendo como principal criterio, la cantidad de agua que se obtiene luego del tratamiento, con los estándares establecidos por la resolución 0631 del 2015 la cual determina la calidad del agua para vertimiento en cuerpos hídricos. A partir de esto se logro encontrar que la eficiencia de las unidades instaladas llegó a alcanzar eficiencias de hasta 79% de permeado, teniendo en cuenta que esto depende de la cantidad de membranas instaladas, la presión que suministran las bombas y la cantidad y calidad de agua a tratar.

**Palabras clave:** Osmosis inversa (RO), eficiencia, Permeado, Rechazo, PTAR, aguas residuales, Res. 631 del 2015.

## ABSTRACT

Water used in mining operations can become contaminated to levels high that are why the treatment of this wastewater has reached be a main component in this industry. Depending on the type of water to be treated, one of the main systems used for water treatment is reverse osmosis (RO), that is why in the present work we describes the process that was carried out for the installation and commissioning of RO systems, with the aim of evaluating their efficiency to treat water from the gold extraction process, having as main criterion, the amount of water obtained after the treatment, with the standards established by resolution 0631 of 2015 which determines the quality of water for discharge into bodies of water. From this I know I managed to find that the efficiency of the installed units reached efficiencias of up to 79% permeate, taking into account that this depends the number of membranes installed, the pressure supplied by the pumps and the quantity and quality of water to be treated.

**Key Words:** Reverse Osmosis (RO), efficiency, Permeate, Rejection, WWTP, wastewater, Res. 631 of 2015.

## 1. INTRODUCCIÓN

Una gran cantidad de agua se usa en la industria minera. No es extraño que una mina de oro use más de cuatro millones de litros diarios (157 m<sup>3</sup>/h aproximadamente) de agua para compensación y operaciones, provocando un estrés considerable en el medio ambiente y los alrededores [1]. Es por esto que a nivel mundial, la industria minera invierte cerca de 7000 millones de dólares cada año en el tratamiento de aguas que resultan de sus procesos productivos. Es inevitable que debido a la escasez del recurso hídrico, en el mundo las

normativas sean más estrictas, por lo que las regulaciones son mayores para evitar daños irreparables tanto en la vida acuática como en la salud de las personas.

La industria minera de Colombia, se enfrenta a nuevos requisitos regulatorios que limitan la descarga de cloruros, arsénico, cadmio y otros componentes de interés en los cuerpos de agua receptores. Para cumplir con estos nuevos estándares regulatorios para la descarga de agua de una mina de metales preciosos Ubicada en Buriticá, Antioquia, se ha desarrollado un nuevo enfoque de tratamiento basado en membranas de osmosis inversa que maximiza la recuperación de más del 97% del agua tratada apta para su eliminación.

Dicho enfoque está basado principalmente en la ósmosis inversa (RO, Reverse Osmosis), es una técnica de desmineralización basada en membranas y usada para separar sólidos disueltos, tales como iones, de una solución. Las membranas en general actúan como barreras permeables selectivas que permiten que algunas sustancias como el agua permee a través de ellas mientras retiene otras sustancias disueltas.[2] Este proceso tiene grandes aplicaciones industriales y comerciales, entre las más comunes esta la desalinización de agua de mar para convertirla en agua potable, la reducción de sólidos disueltos para la alimentación en procesos con calderas o sistemas de vapor, la separación y eliminación de virus para las industrias farmacéuticas, entre muchas aplicaciones más.

Sin embargo dependiendo de la calidad del agua, la presión, la temperatura entre otras variables, este proceso puede perder eficiencia debido a fenómenos conocidos como scaling o fouling que son formaciones de incrustaciones, es decir, la deposición de partículas en una membrana, lo que hace que se obstruya. Es un efecto no deseado que provoca un mayor uso de energía y una vida útil más corta de las membranas, ya que estas necesitarán limpieza con más frecuencia. Es por esto que en el presente proyecto se evaluara la eficiencia del proceso de osmosis inversa, desde diversos aspectos, como la calidad del agua posterior al tratamiento, durabilidad de las membranas, condiciones energéticas de operación entre otras.

El presente trabajo se enmarca dentro del proyecto de tratamiento de aguas residuales que se puso en marcha en la mina de oro de Buriticá, Antioquia.

## **2. OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

- Evaluar la eficiencia del sistema de osmosis inversa en el tratamiento de aguas residuales provenientes de la extracción de oro.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Instalar y poner a punto las unidades de osmosis inversa de la planta.
- Caracterizar el agua a tratar mediante análisis fisicoquímicos, identificando los parámetros más críticos de acuerdo a la resolución 631 del 2015
- Realizar pruebas en las unidades de osmosis inversa analizando el caudal de permeado y el rechazo, además de su respectiva concentración de sales para evaluar la eficiencia de la unidad.
- Proponer mejoras para el cuidado de la unidad, aumentando su vida útil y su

eficiencia.

### 3. METODOLOGÍA

Para cumplir la meta se propuso realizar la siguiente serie de actividades enmarcadas en los estándares más altos de calidad.

- Puesta a punto de las unidades de Osmosis Inversa.

En un primer momento se estudia a detalle el proceso de tratamiento de agua con el objetivo de comprender a cabalidad cada paso del procedimiento llevado a cabo en la PTAR, así como, cada una de las variables involucradas. Posteriormente, se instalan y se ponen a punto las unidades de Osmosis inversa, siguiendo los protocolos y recomendaciones dadas por el fabricante. El paso a paso de la instalación de las unidades se describirá más adelante.

- Análisis físico químico del agua a tratar.

Teniendo en cuenta que en Colombia la normativa que regula los vertimientos es la resolución 631 del 2015, se realizó una caracterización fisicoquímica del agua que sale del proceso de extracción, con el objetivo de identificar los componentes más críticos o problemáticos que contienen dichas aguas.

- Pruebas con la unidad de Osmosis inversa

Luego de la puesta a punto de la unidad de Osmosis, se realizaron pruebas con agua de proceso con el objetivo de evaluar la eficiencia de la unidad, realizando algunas modificaciones en la calidad del agua, simulando los fenómenos que puede traer la operación normal.

- Evaluar la eficiencia de la unidad de osmosis inversa

Luego de realizar las pruebas, se procederá a evaluar la eficiencia de la unidad, desde el punto de vista de separación de sales y durabilidad.

- Propuestas de mejora para el proceso.

Usando la información obtenida, durante el proceso de operación de las unidades de osmosis inversa se esperará proponer algunas mejoras u optimizaciones del proceso.

### 4. ANTECEDENTES

En todo el mundo, el rol que tiene el agua en las industrias es extremadamente importante, ya que esta se usa para todo tipo de procesos y operaciones que involucran cambio energético, disoluciones, como uso diario para los empleados y necesidades básicas, entre muchos otros. Teniendo esto presente, es necesario reconocer que en algunos casos la única fuente que se tiene es el agua de mar por lo que toca desalinizarla para su uso y en otros al usar este líquido se contamina a tales niveles que es necesario tratarla para poder verterla o reutilizarla.

Debido a estas necesidades, en el mundo varias empresas han creado plantas de tratamiento de agua, en donde implementan la osmosis inversa, una operación bastante útil para eliminar las sales y disminuir la conductividad del agua. Algunas de ellas son.

**Pure Aqua, Inc.** Una compañía de Estados Unidos, es una de las primeras en implementar la osmosis inversa para la desalinización del agua, esta empresa ha creado varias plantas basadas en este sistema con diversas capacidades e inclusive algunas de ellas automatizadas con poca intervención humana.[3]

**LENNTECH.** Es una empresa holandesa que ofrece la construcción y puesta en marcha de varios tipos de plantas de tratamiento, tanto de residuos industriales como domésticas, en algunas de ellas, implementa la osmosis inversa siempre teniendo en cuenta la calidad la cual se quiere llegar.

**AMPAC USA.** Otra empresa estadounidense, que ha fabricado varios sistemas de tratamiento de agua y sistemas de desalinización basados en osmosis inversa, tanto en el área doméstico como en el área industrial.

**UNITEK,** es una empresa argentina, relativamente nueva, creada en los años 90, produce y comercializa sistemas y equipos de calidad para el tratamiento de aguas, entre ellas membranas de osmosis inversa que mejoran la calidad física del agua.

## 5. MARCO TEÓRICO

Algunos conceptos clave para entender el proceso de osmosis inversa se presentan a continuación.[4]

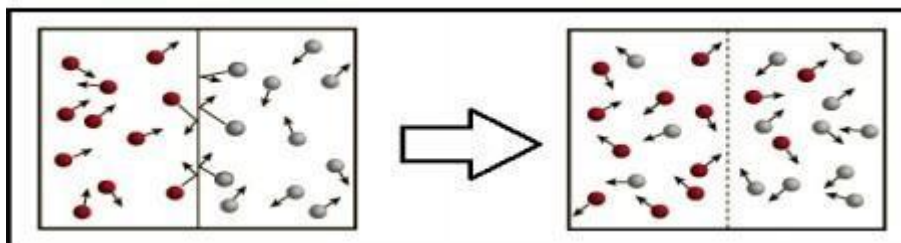
**SOLVENTE** “Sustancia que permite la dispersión de otra en su seno, es la sustancia presente en mayor cantidad de la solución, el solvente más comúnmente usado es el agua”.

**SOLUTO** “Es la sustancia presente en menos cantidad de la solución (aunque existen excepciones), esta sustancia se encuentra disuelta en un determinado disolvente”.

**SOLUCIÓN** “Es la mezcla normalmente homogénea de dos o más sustancias. La solución expresa la relación de la cantidad de soluto a la cantidad de solvente”.

**DIFUSIÓN** “La difusión se refiere al proceso mediante el cual las moléculas se mezclan, como resultado de su energía cinética del movimiento aleatorio. Considere la posibilidad de dos contenedores de gas o líquido A y B separados por un tabique. Las moléculas de ambos gases o líquidos están en constante movimiento y hacen numerosas colisiones con la partición. Si la partición se ha eliminado como en la figura 1, los gases o líquidos se mezclan debido a las velocidades al azar de sus moléculas”.

*Imagen 1. Difusión de moléculas.*

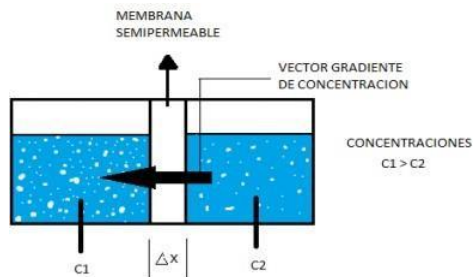


La tendencia a la difusión es muy fuerte, incluso a temperatura ambiente debido a las altas velocidades moleculares asociadas con la energía térmica de las partículas. El fenómeno de la difusión molecular conduce finalmente a una concentración completamente uniforme de sustancias a través de una solución que inicialmente pudo haber sido no uniforme.

**GRADIENTE DE CONCENTRACIÓN.** La diferencia de concentraciones ( $\Delta C$ ), es la diferencia entre las concentraciones de dos soluciones diferentes, es decir:  $\Delta C = C_2 - C_1$

La distancia de separación entre las dos soluciones se la llama  $\Delta X$ , siendo en este caso, el espesor de la membrana, y el gradiente de concentración de difusión, el cual es la relación entre la variación de concentración y la separación de las dos soluciones.

*Imagen 2. Difusión con membrana permeable.*

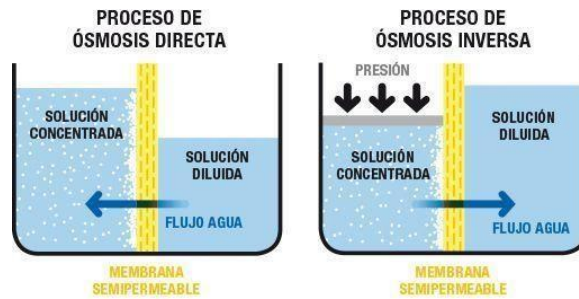


**LEY DE FICK DE LA DIFUSIÓN.** De acuerdo a la figura 2, la ley de Fick nos dice que el flujo de soluto que atraviesa la membrana es proporcional al gradiente de concentración pero en sentido contrario. Todo esto está multiplicado por una constante  $D$  llamada constante de difusión o constante de Fick.

**OSMOSIS** La osmosis es un proceso natural donde el solvente, principalmente agua, fluye a través de una membrana semi-permeable, lo que significa que solo deja pasar las moléculas más pequeñas de solvente, de una solución con una baja concentración de sólidos disueltos a una solución con una alta concentración de sólidos disueltos. El solvente fluye a través de la membrana hasta que la concentración se iguale en ambos lados de la membrana.

**OSMOSIS INVERSA** La osmosis inversa es el proceso en el cual se aplica una presión mayor a la presión osmótica, esta presión es ejercida en el compartimiento que contiene la más alta concentración de sólidos disueltos. Esta presión obliga al agua a pasar por la membrana semi-permeable en dirección contraria a la del proceso natural de osmosis. Para poder purificar el agua necesitamos llevar a cabo el proceso contrario al de ósmosis convencional, es lo que se conoce como Ósmosis Inversa. Se trata de un proceso con membranas, en el cual se aplica una presión mayor a la presión osmótica, esta presión es ejercida en el compartimiento que contiene la más alta concentración de sólidos disueltos. Esta presión obliga al agua a pasar por la membrana semi-permeable en dirección contraria a la del proceso natural de osmosis, dejando las impurezas detrás. La permeabilidad de la membrana puede ser tan pequeña, que prácticamente todas las impurezas, moléculas de la sal, bacterias y los virus, son separados del agua.

Imagen 3. Diferencias Entre el Proceso de Ósmosis Directa e Inversa



## 6. PLANTA DE TRATAMIENTOS DE AGUA RESIDUAL

La planta de tratamientos contiene un proceso que comprende la filtración del medio seguida de RO de preconcentración seguida de un ablandamiento en microfiltración de membrana cerámica seguido de dos etapas adicionales de RO para lograr una recuperación general de más del 97%. La salmuera concentrada de la última etapa de RO se concentra adicionalmente en una pequeña unidad cristalizadora basada en compresión de vapor mecánico. El destilado de la unidad cristalizadora se mezclará con el agua producida por ósmosis inversa para la descarga final al río, mientras que la salmuera concentrada del cristalizador se convertirá en una torta de sal seca en una unidad centrífuga para su eliminación en un vertedero.

El proceso tiene una configuración única que optimiza la capacidad hidráulica del paso de microfiltración de ablandamiento mediante la introducción de RO de preconcentración. La segunda característica única del proceso es el uso de una membrana de microfiltración de cerámica para el suavizado químico en lugar del clarificador suavizante convencional.

El uso de la membrana cerámica permite un mayor flujo operativo, una limpieza más eficaz en el lugar en comparación con la membrana polimérica y una vida mucho más larga de la membrana. El enfoque de tratamiento propuesto minimiza la huella de la planta, que fue una gran limitación en este proyecto debido a la ubicación del sitio y su acceso. El sistema propuesto está altamente modularizado para permitir una rápida instalación y puesta en marcha.

## 7. INSTALACIÓN Y COMISIONAMIENTO DE LAS UNIDADES DE OSMOSIS INVERSA

Para la correcta operación de las unidades de osmosis, estas deben cargarse de manera cuidadosa, garantizando la correcta instalación de sus elementos. Dentro de cada Vessel o tubo se tienen 7 membranas LG BW 440 R.

*Imagen 4. Vessel o tubo en donde se encuentran las membranas.*



## **7.1 INSTALACIÓN DE LA MEMBRANAS DE OSMOSIS.**

Se retiró todos los ensambles de las tapas finales y anillos de empuje de todos los vasos de presión en el sistema de ósmosis inversa, luego se roció agua limpia a través de los vasos de presión abiertos para remover cualquier polvo o escombros presente en el vaso, pero para una limpieza adicional, se creó un hisopo lo suficientemente grande para llenar el diámetro interno del vaso de presión, se remojó el hisopo en una solución de agua y glicerina al 50% en volumen y se movió de atrás hacia adelante a través del vaso de presión hasta que el vaso estuviera limpio y lubricado.

*Imagen 5. Limpieza de los vasos de presión en el sistema de osmosis inversa.*





Luego de que el vaso está completamente limpio, se colocó el extremo delantero de la primera membrana en el extremo del agua de alimentación del primer vaso a presión y se deslizo aproximadamente hasta la mitad de la longitud del elemento.

Se debe verificar que el sello de sal (concentrado) esté correctamente asentado en la ranura de la tapa del extremo del elemento de tal manera que los sellos de sal (concentrado) se abran en dirección aguas arriba. Luego se instaló el interconectar en el tubo de permeado del elemento. Antes de la instalación del interconector, se lubrica los sellos de las juntas tóricas (O-ring) en el interconector con glicerina de grado alimenticio

*Imagen 6. Lubricación de los sellos de las juntas de las membranas.*



El uso de otros lubricantes puede causar problemas de rendimiento.

Posteriormente se levanta el siguiente elemento de la osmosis inversa a su posición y se instala el extremo delantero en el interconector. Se debe tener mucho cuidado de sostener el siguiente elemento para que el peso no sea soportado por el interconector y empuje el elemento dentro del vaso de presión hasta que aproximadamente la mitad del elemento se extienda fuera del vaso.

Se repitió los pasos anteriores hasta que todos los elementos estén cargados en los vasos de presión. El número de elementos cargados dentro de un vaso individual dependerá de la longitud de los elementos y de los vasos de presión. Por último se instaló los anillos de empuje en el extremo de descarga de concentrado del vaso a presión.

Imagen 7. Instalación de los anillos de empuje en el extremo de descarga del vaso a presión.



## 8. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA

En Colombia, la calidad de los vertimientos tanto de aguas domésticas como no domésticas, está regulado por la Resolución 631 del 2015, en esta se dictaminan los parámetros, características y los valores límites máximos permisibles de los vertimientos.

Dentro de esta normativa se encuentra en el artículo 10, la regulación para la industria minera e inclusive se hace una distinción específica en la extracción del oro y metales preciosos. Es de resaltar que de acuerdo con esta resolución hay algunos parámetros que no tienen un valor límite de descarga, sin embargo, solo exige que se mida y se reporte, como es el caso de la dureza en el agua, los nitratos, nitritos, entre otros.

Teniendo esto presente se realizó una caracterización completa del agua que ingresa a la planta de tratamiento con el objetivo de determinar los parámetros claves dentro del proceso. El agua que ingresa a la planta proviene de la pileta de compensación la cual recibe toda el agua que proviene de la extracción del oro, debido a la variabilidad de agua que llega a esta pileta. Cada medida se realizó 3 veces en distintos momentos y se reportó el valor promedio.

Los resultados se pueden ver en la Tabla 1.

Tabla 1. Caracterización completa del agua a tratar en la planta de tratamiento.

Parámetro	Unidad	Valor en el agua a tratar	Límite de descarga (Res. 631 del 2015)
pH	-	6.5 - 8	6.0 - 9.0
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/L O <sub>2</sub>	117	150

Demanda biológica de oxígeno (DQO)	mg/L O <sub>2</sub>	28	50
Sólidos suspendidos Totales	mg/L	60	50
Grasas y aceites	mg/L	1	10
Fenoles	mg/L	0,034	0,2
Hidrocarburos Totales	mg/L	2,8	10
Ortofosfatos	mg/L	2,5	-
Nitratos (NO <sub>3</sub> )	mg/L	3,5	-
Nitritos (NO <sub>2</sub> )	mg/L	6,2	-
Cianuro (CN)	mg/L	0,5	1
Cloruros (Cl <sup>-</sup> )	mg/L	1027	250
Sulfatos (SO <sub>4</sub> )	mg/L	1086	1200
Arsénico (As)	mg/L	1,75	0.1
Cadmio (Cd)	mg/L	0,5	0.05
Zinc (Zn)	mg/L	6	3
Cobre (Cu)	mg/L	0,1	1
Hierro (Fe)	mg/L	2	2
Mercurio (Hg)	mg/L	0,0011	0.002
Dureza Cálctica	mg/L CaCO <sub>3</sub>	4560	-
Dureza Total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	5031	-

Como se puede observar, los parámetros que superan los límites de descarga son los sólidos suspendidos totales, el Cadmio, el Zinc, el Arsénico y los cloruros. Para el caso del primer parámetro mencionado es necesario mencionar que no hay ningún inconveniente, puesto que como se describió anteriormente una de las primeras etapas que tiene la planta son unos filtros multimedia, con lecho de arena, grava y arcilla, que retienen los sólidos suspendidos logrando que el valor de este parámetro quede por debajo del límite permisivo. Los otros parámetros si se intervienen con las unidades de osmosis inversa.

## 9. PRUEBAS DE OPERACIÓN

Dentro de la planta de tratamientos de agua, existe varias etapas de osmosis inversa, para cada una de ellas se realizó las respectivas pruebas de operación, la descripción de cada una y los resultados obtenidos de cada una se describen a continuación.

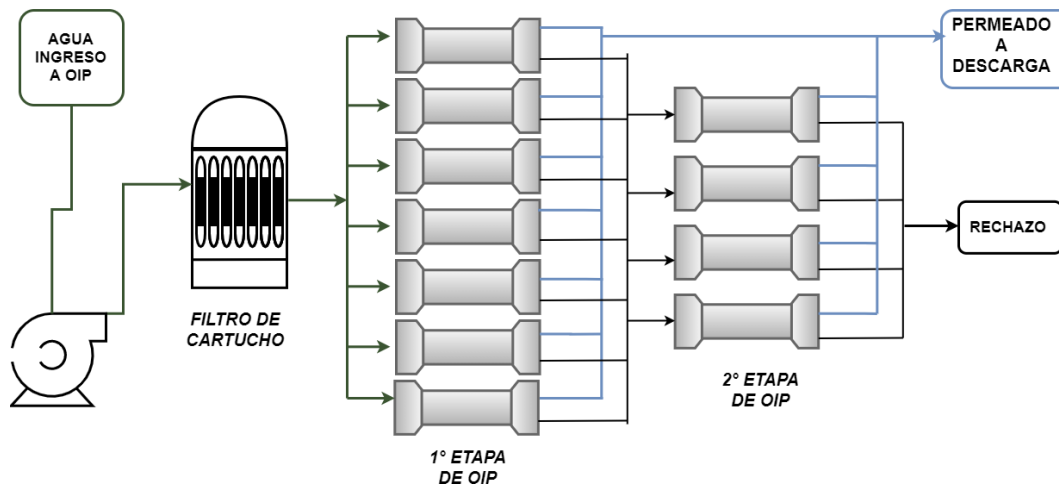
### OSMOSIS INVERSA PRIMARIA.

Es de resaltar que en total existen 4 unidades de osmosis primaria exactamente iguales, 3 en servicio y una en "stand by" para cuando se requiera hacer el lavado químico de

Alguna de las unidades o exista algún problema mecánico que requiera hacer mantenimiento. Para el presente ensayo se puso a prueba solo una de ellas.

Imagen 8. Unidad de osmosis inversa primaria (OIP).

### UNIDAD DE OSMOSIS INVERSA PRIMARIA (OIP)



La unidad de osmosis inversa primaria tiene la capacidad de tratar  $66 \text{ m}^3/\text{h}$ , para la adecuada operación estas unidades, se debe garantizar que el agua que sale de la unidad de filtros multimedia, (etapa previa a la RO) cumpla algunas características antes de ingresar al sistema de osmosis inversa. Entre las más importantes están que el pH este alrededor de 7, que el valor de Potencial óxido-reducción (ORP) tenga un valor máximo de 250, el ORP es una medida de la capacidad de oxidación que tiene una solución, expresada en mV. Permite determinar indirectamente la concentración de cloro libre, esto es importante debido a que a las membranas debe ingresar agua con una concentración por debajo de 0.1 ppm de cloro residual.

Imagen 9. Membranas de la unidad de osmosis inversa.





Para lograr las condiciones óptimas del agua, antes de que el agua ingrese a las unidades de ósmosis inversa primaria, se deben adicionar los siguientes reactivos:

**Acido clorhídrico al 32%:** Se adiciona para reducir el pH antes de la alimentación a las unidades de RO y así reducir la formación de depósitos de carbonato de calcio y otras sales en la membrana. Su adición es automática para lograr el pH deseado en la línea.

**Antiincrustante:** Con este se evita la cristalización de constituyentes y su posterior incrustación en las membranas y en las conducciones del rechazo. La dosificación automática se da en función del caudal de agua de alimentación y de la dosis recomendada por el proveedor.

**Metabisulfito de sodio:** La dosificación de metabisulfito elimina el cloro y los oxidantes residuales en el efluente de la filtración multimedia (MMF). Esta se realiza automáticamente por lectura del ORP en la corriente. La acción del meta bisulfito es doble por su naturaleza bacteriostática (constituye una segunda barrera a las bacterias) y por su capacidad reductora frente a la acción oxidante del cloro.



*Imagen 10. Zona Dosificadora.*

También es necesario mencionar que luego de la dosificación de reactivos el agua filtrada pasa por una serie de filtros de cartucho, que están diseñados para remover todas las partículas suspendidas con un tamaño superior a 5 micras. Los cartuchos de estos filtros son reemplazables y elaborados en polipropileno. El cambio de cartuchos se realiza cuando el diferencial de presión de la unidad supera el máximo permitido (69 Kpa). En la unidad existen instrumentos en línea que evalúan los parámetros importantes en el control del aguade alimentación de las unidades de ósmosis inversa primaria (pH, ORP y caudal).



Imagen 11. Tablero de parámetros y flujo metro.

Adicional al control en línea, se deben realizar análisis puntuales de algunos parámetros para verificar que el proceso esté trabajando adecuadamente. Entre estos análisis se incluye el de cloro libre, para verificar que el metabisulfito si esté actuando adecuadamente.

Teniendo todo esto presente se corrió la unidad de Osmosis inversa y se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 2. Resultados de la unidad de osmosis inversa.

	<b>Entrada OIP</b>	<b>Alimentación</b>	<b>Permeado</b>	<b>Rechazo</b>
<b>Flujo [<math>m^3/h</math>]</b>	66,09	66,09	46,27	19,82
<b>Presión [Psi]</b>	0	176,56	42,61	150,03
<b>Arsénico [ppm]</b>	1,75	1,75	0,09	5,83
<b>Cadmio [ppm]</b>	0,5	0,5	0,03	1,7
<b>Zinc [ppm]</b>	6	6	0,3	19,98
<b>Cloruros [ppm]</b>	1250	1250	34	4416
<b>Conductividad [<math>\mu S/cm</math>]</b>	4856	4856	86	5953

Como se puede observar en la tabla anterior, la unidad de osmosis inversa logra obtener agua con la calidad necesaria para vertimiento, para este caso solo se analizo los parámetros críticos que no cumplían con la normativa. Para esta unidad de osmosis primaria la eficiencia fue de:

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Flujo de permeado}}{\text{Flujo de alimentación}} * 100 = \frac{46,27}{66,09} * 100 = 70\%$$

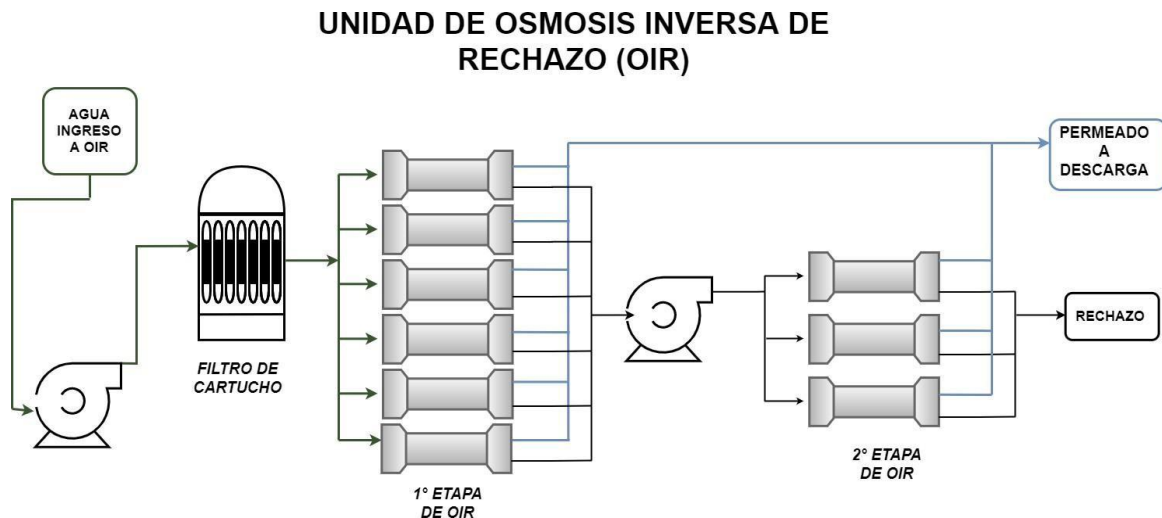
En cuanto a durabilidad, otros parámetros controlados en la unidad permiten evaluar el desempeño del sistema y definir la necesidad de una limpieza o reemplazo de membranas, Cualquier cambio en la presión diferencial hasta 15% mayor en comparación con el valor reportado desde el inicio de la operación o mayor a 10 psi por membrana requiere la limpieza de estas. De manera similar, una disminución del 10% en el flujo de permeado o un aumento del 10% en la conductividad del permeado indica que se requiere limpieza in situ (CIP) para las membranas, Cualquier mantenimiento requerido para la unidad se debe realizar en el estado Offline para garantizar la seguridad de los colaboradores.

El permeado obtenido en ambas etapas de la ósmosis inversa primaria se almacena en el tanque de agua tratada, donde el agua se envía hacia el vertimiento o a otro tanque de almacenamiento para su recirculación. Es recomendable evaluar la calidad del agua periódicamente para corroborar el buen funcionamiento de la unidad, además de identificar si existe algún sensor con posibles fallas o errores.

### OSMOSIS INVERSA DE RECHAZO.

Dentro del proyecto existen 3 unidades de osmosis de rechazo totalmente iguales, para el caso de estudio, solo se analiza una sola. El agua de ingreso a estas unidades es el rechazo de la osmosis primaria después de pasar por un proceso de eliminación de dureza cálcica y un proceso de microfiltración para la eliminación de iones metálicos.

Imagen 12. Unidad de osmosis inversa de rechazo.



La unidad de osmosis inversa de rechazo, tiene la capacidad de tratar 30 m<sup>3</sup>/h, A diferencia de la unidad de OIP, a esta ya no se le adiciona bisulfito de sodio, puesto que el

cloro libre ya se eliminó previamente, pero por medio de bombas dosificadoras, se adiciona anti incrustante para evitar la deposición de los constituyentes que pueden ensuciar las membranas de la unidad de osmosis. Se dosifica para asegurar una concentración de 5 ppm del químico en la línea de proceso.

Antes de ingresar a la unidad de ósmosis de rechazo, el agua pasa por una batería de filtros con cartuchos de 5 micras (nominal). En la batería siempre hay algunos filtros fuera de operación y otros en servicio. Cuando se presentan deltas de presión elevados en una unidad entonces esta se retira de servicio mientras se realiza el cambio de cartuchos y a su vez una que está en espera se pone en servicio.

Durante el arranque de las líneas que estaban en servicio el permeado puede presentar concentraciones elevadas de iones y elementos; este permeado no va hacia el tanque de agua tratada, sino que vuelve al sistema. Cuando se alcanzan las condiciones esperadas de flujo y conductividad del permeado entonces se reactiva el paso hacia el tanque de agua tratada, y el rechazo pasa a la etapa siguiente.

Teniendo presente lo anterior se puso en marcha la unidad, obteniendo los siguientes resultados presentados en la Tabla 3.

*Tabla 3. Resultados de la unidad de osmosis inversa de rechazo (OIR).*

	<b>Entrada OIR</b>	<b>Alimentación</b>	<b>Permeado</b>	<b>Rechazo</b>
<b>Flujo [m<sup>3</sup>/h]</b>	29,3	29,3	23,15	6,2
<b>Presión [Psi]</b>	0	477,77	46,39	653,11
<b>Arsénico [ppm]</b>	1,46	1,46	0,03	6,99
<b>Cadmio [ppm]</b>	0,42	0,42	0,008325	2
<b>Zinc [ppm]</b>	0,8	0,8	0,01598	3,84
<b>Cloruros [ppm]</b>	1754	1754	125	2145
<b>Conductividad [µs/cm]</b>	6581	6581	86	10845

De acuerdo con la tabla anterior, se logra una eficiencia de 79%

$$Eficiencia = \frac{Flujo\ de\ permeado}{Flujo\ de\ alimentación} * 100 = \frac{23,15}{29,3} * 100 = 79\%$$

Es de resaltar que esta eficiencia se logra debido a que el flujo que se trata es tan solo una tercera parte de lo que trata la osmosis inversa primaria, aunque con una cantidad de sales mayor, debido a que en esta unidad recibe el rechazo de las unidades previas del tratamiento, por lo que existe una mayor concentración de iones y sales en el agua que ingresa.

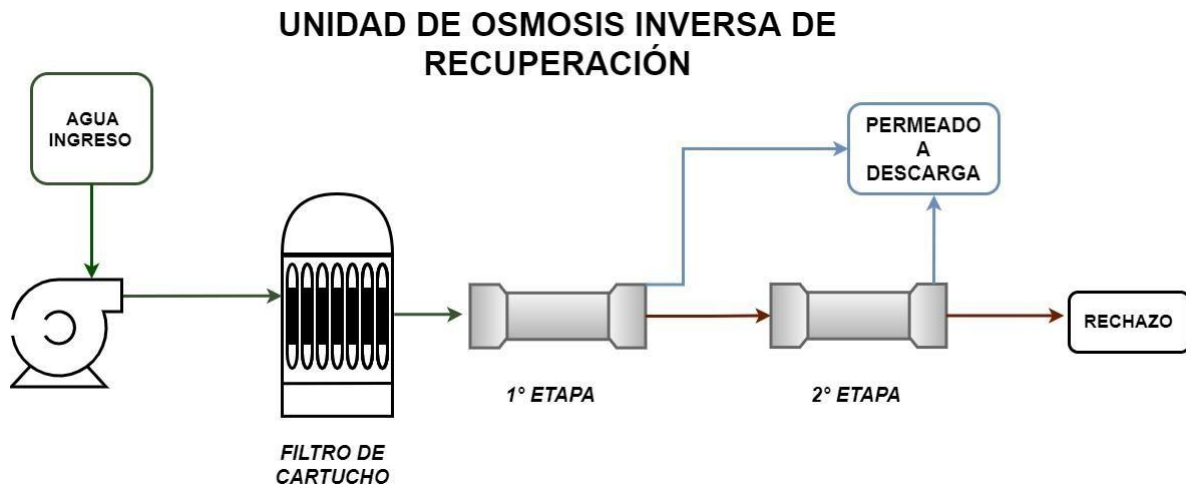
De manera similar a la osmosis primaria, cualquier cambio en la presión diferencial hasta 15% mayor en comparación con el valor reportado desde el inicio de la operación o mayor a 10 psi por membrana requiere la limpieza de estas, además de una disminución del 10%



en el flujo de permeado o un aumento del 10% en la conductividad del permeado indica que se requiere limpieza in situ (CIP) para las membranas. Cualquier mantenimiento requerido para la unidad se debe realizar en el estado Offline para garantizar la seguridad de los colaboradores.

## OSMOSIS INVERSA DE RECUPERACIÓN

En el proyecto existen 2 unidades de osmosis de recuperación, para el presente estudio solo se hizo pruebas con una sola de ellas.



La osmosis inversa de recuperación está compuesta de dos etapas, la primera con un total de 14 membranas y la segunda con un total de 14 membranas, distribuidas en dos arreglos que permiten que 1 arreglo esté en uso mientras el otro está en limpieza o mantenimiento.

El agua alimentada pasa por dos etapas en la unidad RO de recuperación, logrando una recuperación del 45%. Cualquier variación en este valor significa que se requiere alguna acción o que la calidad del agua de alimentación varió significativamente. Se obtiene un flujo de 5.5 m<sup>3</sup>/h de permeado y 6.8 m<sup>3</sup>/h de rechazo.

Siempre hay una línea en servicio por cada etapa, mientras la otra está en funcionamiento. Durante el arranque de las líneas que estaban en servicio el permeado puede presentar concentraciones elevadas de iones y elementos; este permeado no va hacia el tanque de agua tratada, sino que vuelve al sistema. Cuando se alcanzan las condiciones esperadas de flujo y conductividad del permeado entonces se reactiva el paso hacia el tanque de agua tratada, y el rechazo pasa a la etapa siguiente.

Cualquier cambio en la presión diferencial hasta 15% mayor en comparación con el valor reportado desde el inicio de la operación o mayor a 10 psi por membrana requiere la limpieza de estas. De manera similar, una disminución del 10% en el flujo de permeado o un aumento del 10% en la conductividad del permeado indica que se requiere limpieza in situ (CIP) para las membranas. Cualquier mantenimiento requerido para la unidad se debe realizar en el estado Offline para garantizar la seguridad de los colaboradores.

Teniendo presente lo anterior se puso en marcha la unidad, obteniendo los siguientes resultados presentados en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados de la unidad de osmosis inversa de recuperación.

	Entrada	Alimentación	Permeado	Rechazo
<b>Flujo [<math>m^3/h</math>]</b>	12,3	12,3	5,5	6,8
<b>Presión [Psi]</b>	0	730,4	20,4	620,5
<b>Arsénico [ppm]</b>	6,99	6,99	0,140	12,73
<b>Cadmio [ppm]</b>	2,00	2,00	0,04	3,6363
<b>Zinc [ppm]</b>	3,84	3,84	0,08	6,9818
<b>Cloruros [ppm]</b>	2145	2145	132	3579
<b>Conductividad [<math>\mu s/cm</math>]</b>	10845	10845	103	19765

De acuerdo con la tabla anterior, se logra una eficiencia de 45%

$$Eficiencia = \frac{Flujo\ de\ permeado}{Flujo\ de\ alimentaci3n} * 100 = \frac{5,5}{12,3} * 100 = 45\%$$

Es de resaltar que esta eficiencia es baja, pero esto es justificable debido a que no se tienen gran cantidad de membranas en esta unidad, además la concentración de los iones es más alta que cualquiera de las unidades anteriores.

## 10. COSTO ENERGÉTICO DE LAS UNIDADES DE OSMOSIS.

Teniendo presente que las unidades de osmosis inversa solamente tienen como gasto energético las bombas que impulsan el agua, logrando altas presiones, se va a establecer el consumo energético de cada una de las distintas bombas de las osmosis.

La bomba de la osmosis inversa primaria tiene una capacidad de 60 hp, debido a que la unidad está diseñada para trabajar 24 horas del día, la unidad consume 1073 kWatts cada día.

Para el caso de la osmosis inversa de rechazo, la cual trabaja con 2 bombas una de 150 hp y una de 25 hp el consumo, las cuales tendría un consumo por día de 2684 Kwatts y de 447,42 kWatts respectivamente

Para el caso de la osmosis inversa de recuperación se tiene una única bomba de 50 hp, la cual consumiría al día 985 kWatts

Cuando la planta de tratamiento está trabajando a full capacidad, se opera 3 osmosis primarias, 2 osmosis de rechazo y una osmosis de recuperación, lo que en representa que en total la etapa primaria consume 3219 kW al día, la etapa de rechazo consume 6262,4 kW al día y la etapa de recuperación 985kW cada día.

## 11. LIMPIEZA DE LAS UNIDADES DE OSMOSIS

Parte del correcto mantenimiento de las unidades de osmosis, involucra la limpieza, es por esto que a continuación se describe el paso a paso para realizar este procedimiento.

Antes de iniciar la limpieza química, se recomienda hacer una inspección a los filtros de cartucho o prefiltros, tanto a los de alimentación como a los del skid de limpieza. Esto para descartar problemas con el pretratamiento.

- i. Lave todos los recipientes con permeado de ósmosis inversa desde el tanque CIP hasta que el agua del proceso de alimentación-concentrado se haya desplazado por completo. El permeado de ósmosis inversa utilizado para enjuagar y mezclar productos químicos de limpieza debe estar libre de cloro u otro agente oxidante.

### ii. Preparación solución alcalina

- Adicionar agua de dilución (debe ser permeado de la ósmosis y sin cloro libre) en el tanque CIP hasta completar el volumen necesario (aproximadamente 3.3 m<sup>3</sup>)
- Adicionar las escamas de NaOH al tanque de dilución: se debe hacer paulatinamente e ir recirculando a una baja velocidad. A medida que se van diluyendo las escamas se debe ir monitoreando el pH hasta alcanzar un valor de 12.
- Finalmente, adicionar el volumen indicado de los productos PC-67 y PC-33. Terminar de mezclar con la bomba de recirculación.
- La temperatura de la solución debe estar preferiblemente entre 30 – 35 °C. Por lo que se debe encender la resistencia con el fin de alcanzar este rango de temperatura. Una vez alcanzada, se continúa con los pasos posteriores.
- Mida la temperatura y el flujo de la solución de limpieza durante el inicio, la mitad y el final de los períodos de recirculación.

- iii. Bombeo de bajo flujo. Bombear la solución limpiadora mezclada y precalentada al recipiente en condiciones de bajo flujo y baja presión para desplazar el agua de proceso remanente, según la siguiente tabla:

	Número de vasos	Flujo
RO Primaria Etapa 1	7	32 m <sup>3</sup> /h (140 GPM)
RO Primaria Etapa 2	4	18 m <sup>3</sup> /h (80 GPM)
RO Rechazo Etapa 1	6	27 m <sup>3</sup> /h (120 GPM)
RO Rechazo Etapa 2	3	14 m <sup>3</sup> /h (60 GPM)

No permita que el agua de proceso de alimentación-concentrado desplazada de la introducción de la solución de limpieza entre en el tanque de limpieza. La presión debe ser lo suficientemente baja como para que esencialmente se produzca poco permeado.

Deseche el concentrado, según sea necesario, para evitar la dilución de la solución limpiadora. Hacer desplazamiento en las membranas con la solución hasta que el pH de salida sea igual a la de entrada.

- iv. **Reciclar.** Después de que el agua del proceso se desplace, la solución limpiadora estará presente en la corriente de concentrado. Luego recicle el concentrado hacia el tanque de la solución limpiadora y permita que la temperatura se estabilice:

	Número de vasos	Flujo
RO Primaria Etapa 1	7	64 m <sup>3</sup> /h (280 GPM)
RO Primaria Etapa 2	4	36 m <sup>3</sup> /h (160 GPM)
RO Rechazo Etapa 1	6	54 m <sup>3</sup> /h (240 GPM)
RO Rechazo Etapa 2	3	27 m <sup>3</sup> /h (120 GPM)

Si el volumen inicial de solución de limpieza que regresa al tanque está extremadamente sucio, deséchelo también y reponga la solución desechada en el tanque. Mida el pH de la solución y ajuste el pH si es necesario. Realizar este proceso por un periodo de 45 minutos.

- v. **Remojo:** Apague la bomba y deje que los elementos se empapen. A veces un período de remojo de aproximadamente 1 hora es suficiente. Para las incrustaciones difíciles un período de remojo prolongado es beneficioso; remoje los elementos durante la noche por 10-15 horas. Para mantener una temperatura alta durante un período de remojo prolongado, utilice una tasa de recirculación lenta.
- vi. Preparar nuevamente solución alcalina con los pasos mencionados en ii). Alimente la solución según los caudales del paso iv) y recicle durante otros 60 minutos. Controle de cerca el pH de la solución de limpieza durante el proceso de limpieza y ajuste el pH según sea necesario (12 alcalino). Las caídas de presión máximas recomendadas son de 15 psi por elemento o 50 psi por recipiente multielemento, el valor que sea más limitante. Se recomienda la limpieza cuando la caída de presión aumenta en un 15%. Una caída de presión por encima de 50 psi en una sola etapa puede causar un daño significativo a la membrana.
- vii. **Enjuague:** Se recomienda utilizar permeado de ósmosis inversa libre de cloro o agua desionizada para enjuagar la solución de limpieza. Debe evitarse el agua cruda prefiltrada o el agua de alimentación, ya que sus componentes pueden reaccionar con la solución de limpieza: puede producirse la precipitación de agentes contaminantes en los elementos de la membrana. La temperatura mínima de enjuague es de 20°C. Enjuague la solución de limpieza de pH alto de los recipientes usando permeado de RO hasta que el pH del agua de lavado que sale del recipiente esté cerca del pH del agua de lavado que ingresa al recipiente. Una vez que la solución de pH alto se haya enjuagado de todos los recipientes a presión y tuberías, proceda con una limpieza de pH ácido.

**viii. Preparación solución ácida**

- Adicionar agua de dilución (debe ser permeado de la ósmosis y sin cloro libre) en

Salto de página

- el tanque CIP hasta completar el volumen necesario (aproximadamente 3.2 m<sup>3</sup>)
- Adicionar el volumen indicado de HCl e ir recirculando. Se debe monitorear el pH hasta alcanzar un valor entre 1 y 2.
- Finalmente, adicionar el volumen indicado del producto PC-77. Terminar de mezclar con la bomba de recirculación.
- La temperatura de la solución debe estar preferiblemente cerca de 25 °C. Por lo que se debe encender la resistencia con el fin de alcanzar este rango de temperatura. Una vez alcanzada, se continúa con los pasos posteriores.

Siga los límites de temperatura y pH adecuados. Los flujos, el tiempo de recirculación y la presión diferencial máxima para la limpieza con ácido son los mismos que para la limpieza alcalina, de acuerdo con los pasos iii), iv), v), vi) y vii).

ix. Los productos químicos de limpieza pueden estar presentes en el permeado después de la limpieza. Al reiniciar (después de la limpieza), el permeado de ósmosis inversa debe dirigirse al drenaje durante un mínimo de 10 minutos. Tenga en cuenta que la conductividad del permeado suele aumentar después de una limpieza y puede llevar algún tiempo estabilizarse.

### **Recomendaciones adicionales**

- Se recomienda encarecidamente limpiar las etapas del sistema RO por separado. Esto es para evitar que el foulant eliminado de la etapa 1 sea empujado a la 2<sup>a</sup> etapa, lo que resulta en una mínima mejora del rendimiento de la limpieza.
- Es necesario preparar una solución de limpieza fresca cuando la solución de limpieza se enturbie y/o decolore. La recirculación de alto flujo, sin embargo, debe realizarse por separado para cada etapa, de modo que el flujo no sea demasiado bajo en la primera etapa ni demasiado alto en la última.
- Siempre medir el pH durante la limpieza. Si el pH aumenta más de 0,5 unidades de pH durante la limpieza ácida, es necesario añadir más ácido. Si el pH disminuye más de 0,5 unidades de pH durante la limpieza alcalina, es necesario añadir más cáustico.
- Largos tiempos de remojo. Es posible que la solución esté completamente saturada y los ensucadores pueden precipitarse de nuevo en la superficie de la membrana. Además, la temperatura bajará durante este período, por lo que el remojo se hace menos efectivo. Se recomienda hacer circular la solución con regularidad para mantener la temperatura (la temperatura no debe bajar más de 5°C) y añadir productos químicos si es necesario ajustar el pH.
- Las soluciones de limpieza turbias o de colores fuertes deben ser reemplazadas. La limpieza se repite con una solución de limpieza fresca.

## 12. CONCLUSIONES.

A partir del presente estudio se puede concluir que la osmosis inversa es una fuerte herramienta para la purificación de agua, ya que dependiendo de su arreglo, se puede llegar a alcanzar eficiencias por encima del 95% en la recuperación de agua potable. Para el presente caso de estudio de llego a alcanzar 79% de la recuperación del agua con la calidad exigida por la normativa colombiana.

Es importante mencionar que para lograr un buen rendimiento de las unidades de osmosis, todas las condiciones de entrada se deben cumplir, es decir, sin sólidos suspendidos o material orgánico presente, sin cloro libre y con el pH adecuado, ya que como se pudo observar en las pruebas realizadas, en caso de tener alguna de estas variables fuera del rango apropiado, las membranas pierden efectividad e inclusive podrían a tener daños irreversibles.

El coste energético es relativamente bajo, ya que el único requerimiento es impuesto por las bombas requeridas para superar la presión osmótica y lograr altos flujos de permeado con buena calidad.

Mediante el presente trabajo se puede concluir que durante la operación continua de las unidades de osmosis, es de gran relevancia estar atento a las variables claves para concluir que la unidad requiere limpieza, ya que entre más tiempo se posponga esta actividad, se pueden generar saturación excesiva de las membranas ocasionando mayores daños y pérdida de eficiencia a largo plazo.

El mantenimiento de las membranas es barato y se requiere de pocos insumos, además el cambio definitivo de estas, puede llegar a producirse alrededor de los 2 a 4 años dependiendo de su uso y de los cuidados que se le den, es decir, que el agua que ingrese a la unidad de osmosis inversa, tenga las condiciones necesarias para evitar las incrustaciones, que en ingles se le conocen como biofouling and scaling.

## 13. BIBLIOGRAFÍA

[1] López, J., Sahuquillo, S., Marquez, D., & Quiroga, M. (2000). Uso De La Osmosis Inversa Para La Regeneración De Aguas Residuales Urbanas. Optimización del Pretratamiento. *Ingeniería del Agua*, Vol 7. Consultado el 09 de Julio del 2020. Recuperado de: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/2837/72article5.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

[2] AMPAC (2020). Industrial reverse osmosis system. Northridge (Estados Unidos): Consultado el 10 de Septiembre, 2020. Disponible en: <https://www.ampac1.com/applications>

[3] acquamatter (2020). Osmosis inversa y destilador de agua. [Consultado el 25 de Septiembre, 2020]. Disponible en: <http://www.acquamatter.com/>

[4] Moreno, J. (2011). *Diseño De Planta De Tratamiento De Agua De Osmosis Inversa Para La Empresa Dober Osmotech De Colombia LTDA*. Universidad Autónoma de Occidente. Facultad de Ingenierías. Colombia. Disponible en: <https://red.uao.edu.co/bitstream/10614/3077/1/TBM00990.pdf>

[5] INCONTEC (2015). NORMA TECNICA COLOMBIANA. Normas oficiales para la calidad de agua en Colombia. NTC 813. 2 ed. Bogotá D.C.: Instituto Colombiano de Normas técnicas y certificación,

[6] Pall Corporation(2020). Tratamiento de aguas en la industria minera. Consultado el 10 de noviembre del 2020. Disponible en: <https://shop.pall.com/us/en/search?SearchTerm=miner%C3%ADa+%&selectedtab=&resetsearch=true#>

[7] LG Water Solution (2020). Fichas técnicas de membranas de osmosis inversa. Consultado el 10 de noviembre del 2020. Disponible en <http://www.lgwatersolutions.com/es/product/brackish-water-ro>