



UNIVERSIDAD NACIONAL “PEDRO RUIZ GALLO”



**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA E
INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

TESIS

**“EFECTO DEL FLUJO VOLUMÉTRICO Y
VARIACIÓN DE PRESIÓN SOBRE EL
PORCENTAJE DE SÍLICE EN EL
PERMEADO DURANTE EL PROCESO DE
OSMOSIS INVERSA DE AGUA DE POZO DE
LA EMPRESA AGROLMOS.S.A”**

PRESENTADO POR:

Bach.: DELGADO RIVERA YESENIA ESPERANZA

Bach.: DIAZ ABANTO EDITH KARINA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO QUÍMICO

**LAMBAYEQUE – PERU
2018**



UNIVERSIDAD NACIONAL “PEDRO RUIZ GALLO”



FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA E INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

TESIS

“EFECTO DEL FLUJO VOLUMÉTRICO Y VARIACIÓN DE PRESIÓN SOBRE EL PORCENTAJE DE SÍLICE EN EL PERMEADO DURANTE EL PROCESO DE OSMOSIS INVERSA DE AGUA DE POZO DE LA EMPRESA AGROLMOS.S.A”

Para optar el Título Profesional de:
INGENIERO QUÍMICO

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Ing. M.Sc. RUBEN DARIO SACHUN GARCIA
PRESIDENTE

Ing. GERARDO SANTAMARIA BALDERA
SECRETARIO

Ing. M.Sc. SEBASTIAN HUANGAL SCHEINER
VOCAL

Ing. M.Sc. JUAN CARLOS DIAZ VISITACION
ASESOR

LAMBAYEQUE – PERU
2018

DEDICATORIA

El presente trabajo investigativo lo dedicamos principalmente a Dios, por ser el inspirador y darnos fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados.

A nuestros padres, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes hemos logrado llegar hasta aquí y convertirnos en lo que somos. Ha sido el orgullo y el privilegio de ser sus hijas, son los mejores padres.

A nuestros hermanos (os) por estar siempre presentes, acompañándonos y por el apoyo moral, que nos brindaron a lo largo de esta etapa de nuestras vidas.

A todas las personas que nos han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que nos abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.

AGRADECIMIENTO

Me van a faltar páginas para agradecer a las personas que se han involucrado en la realización de este trabajo, sin embargo, merecen reconocimiento especial mi Madre y mi Padre que con su esfuerzo y dedicación me ayudaron a culminar mi carrera universitaria y me dieron el apoyo suficiente para no decaer cuando todo parecía complicado e imposible.

Asimismo, agradezco infinitamente a mis Hermanos que con sus palabras me hacían sentir orgulloso de lo que soy y de lo que les puedo enseñar. Ojalá algún día yo me convierta en se fuerza para que puedan seguir avanzando en su camino.

De igual forma, agradezco a mi asesor de Tesis, que gracias a sus consejos y correcciones hoy puedo culminar este trabajo. A los Profesores que me han visto crecer como persona, y gracias a sus conocimientos hoy puedo sentirme dichoso y contento.

INDICE

I. MARCO TEORICO.....	12
1.1 ANTECEDENTES DE ESTUDIO	12
1.2 BASE TEORICA CIENTIFICA	15
1.2.1 EMPRESA AGROINDUSTRIAL AGROLMOS	15
1.2.2 OSMOSIS INVERSA.....	16
1.2.3 TIPOS DE MEMBRANAS PARA OSMOSIS INVERSA	32
1.2.4 PARÁMETROS DE OPERACIÓN EN LA OSMOSIS INVERSA	45
1.2.5 DESEMPEÑO DE LA OSMOSIS INVERSA.....	52
1.2.6 SILICE	58
1.2.7 DESCRIPCION DEL PROCESO OSMOSIS INVERSA DE LA PLANTA AGROLMOS	62
1.2.8 TERMINOLOGIA EMPLEADA EN LA OPERACIÓN DE OSMOSIS INVERSA.....	67
II. MATERIALES Y METODOS.....	68
2.1 POBLACION Y MUESTRA	68
2.2 EQUIPOS Y MATERIALES DE LABORATORIO	68
EQUIPOS.....	68
2.3 PROCEDIMIENTO	69
III. RESULTADOS	72
3.1 ANALISIS FISICOQUIMICO DEL AGUA DE ALIMENTACION A LA OI	72
3.2 CONDUCTIVIDAD DE LOS PERMEADOS OBTENIDOS	73
3.3 CONTENIDO DE SILICE EN LOS PERMEADOS OBTENIDOS	75
3.4 PORCENTAJE DE RECUPERACION DEL PROCESO DE OSMOSIS INVERSA	77
IV. DISCUSION.....	80
V. CONCLUSIONES	82
VI. RECOMENDACIONES.....	83
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	84
VII. ANEXOS	87
ANEXO 1: PRODUCTOS QUIMICOS UTILIZADOS EN EL PROCESO DE O.I.	87
ANEXO 2 :PORCENTAJE DE RECHAZO POR TIPO DE MEMBRANA.....	88
ANEXO 3:CLASIFICACION SEGÚN SU SALINIDAD.....	89
ANEXO 4:QUIMICOS QUE PUEDEN SER UTILIZADOS PARA EL LAVADO DE MEMBRANAS.....	89
ANEXO 5:PARAMETROS CARACTERISTICOS DEL AGUA,SEGÚN SU PROCEDENCIA.....	90

INDICE

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de Osmosis	18
Figura 2. Proceso de Osmosis Inversa	19
Figura 3. Proceso de osmosis inversa	19
Figura 4. Rechazo de osmosis inversa	20
Figura 5. Sistema tipico de osmosis inversa	26
Figura 6. Daños en las membranas ocasionados por caída de presión excesiva	30
Figura 7. Construcción de una Membrana en espiral.....	37
Figura 8. Filtro con membrana de fibra fina hueca	38
Figura 9. Parámetros a considerar en el diseño de una membrana de osmosis inversa.	45
Figura 10. Elementos de un sistema de osmosis inversa.....	58
Figura 11. Diagrama del flujo del proceso de Osmosis Inversa en Planta Agrolmos	63
Figura 12. Bomba sumergible (Planta Agrolmos).	62
Figura 13. Tanque de almacenamiento de agua cruda (Planta Agrolmos).....	63
Figura 14. Filtro zeolita (Planta Agrolmos)	64
Figura 15. Tratamiento químico (Planta Agrolmos)	64
Figura 16. Filtros cartucho (Planta Agrolmos).....	65
Figura 17. Membranas de O.I. (Planta Agrolmos).....	65
Figura 18. Agua de rechazo de la O.I. (Planta Agrolmos)	66
Figura 19. Agua permeada de la O.I. (Planta Agrolmos).....	66
Figura 20. Almacenamiento de agua permeada (Planta Agrolmos).....	66
Figura 21. Diagrama de bloques del procedimiento para obtención de resultados	71
Figura 22. Promedios de la variable CONDUCTIVIDAD en función de la PRESION a diferentes FLUJOS de alimentación de agua al sistema de osmosis inversa.	74
Figura 23. Promedios de la variable SILICE en función de la PRESION a diferentes FLUJOS de alimentación de agua al sistema de osmosis inversa.	77
Figura 24. Promedios de la variable RECUPERACION en función de la PRESION a diferentes FLUJOS de alimentación de agua al sistema de osmosis inversa.	79

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Aplicaciones de la Osmosis Inversa en Tratamiento de Agua.....	24
Tabla 2 Directrices de calidad de agua generalmente aceptadas para minimizar obstrucción de la membrana de Osmosis Inversa	28
Tabla 3 Directrices de calidad de agua generalmente aceptadas para minimizar la incrustación de la membrana de Osmosis Inversa	30
Tabla 4 Comparación de las membranas de poliamidas y de acetato de celulosa	32
Tabla 5 Comparación de los módulos básicos de membrana para osmosis inversa.....	36
Tabla 6 Comparación de sist. de membranas Koch Membranas de agua de mar.....	41
Tabla 7 Flujo recomendado como función de la fuente de agua efluente	47
Tabla 8 Factor de concentración como función del porcentaje de recuperación	49
Tabla 9 Índices de rechazo típicos de una membrana de osmosis inversa	53
Tabla 10 Análisis fisicoquímico de las muestras de agua de pozo:Morrope.....	56
Tabla 11 Costo de producción de agua en una planta desalinizadora de agua de mar de 200000 m ³ /día con tecnología de Osmosis Inversa.....	56
Tabla 12 Tolerancias de sílice en aguas de alimentación para calderas de tipo tambor	60
Tabla 13 Análisis fisicoquímico del agua alimentada a las membranas de osmosis inversa de la Empresa Agroindustrial Olmos.	72
Tabla 14 Variación de la conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$) del permeado en función de la caída de presión y flujo de alimentación en base a agua de ingreso con 1315 $\mu\text{S}/\text{cm}$	73
Tabla 15 Valores promedios de la conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$) del permeado en función de la caída de presión y flujo de alimentación en base a agua de ingreso con 1315 $\mu\text{S}/\text{cm}$	73
Tabla 16 Análisis de la varianza de la variable CONDUCTIVIDAD en los grupos establecidos por las combinaciones de las variables PRESION y FLUJO.	74
Tabla 17 Variación del contenido de sílice (como ppm de SiO ₂) en el permeado en función de la caída de presión y flujo de alimentación durante la OI.....	75
Tabla 18 Valores promedios del contenido de sílice en el permeado (ppm SiO ₂) en función de la caída de presión y flujo de alimentación.	76
Tabla 19 Análisis de la varianza de la variable SILICE en los grupos establecidos por las combinaciones de las variables PRESION y FLUJO.	76
Tabla 20 Variación del porcentaje de recuperación de permeado en función de la caída de presión y flujo de alimentación.....	78
Tabla 21 Valores promedios del porcentaje de recuperación de permeado en función de la caída de presión y flujo de alimentación.	78
Tabla 22 Análisis de la varianza de la variable RECUPERACION en los grupos establecidos por las combinaciones de las variables PRESION y FLUJO.	79

RESUMEN

Teniendo en cuenta que la sílice es el enemigo número uno de los procesos industriales ya que ocasiona todo tipo de problemas en calderas de alta presión y alabes de turbina, esta investigación tiene como objetivo el efecto del flujo volumétrico y variación de presión sobre el contenido de sílice en el permeado durante el proceso de osmosis inversa de agua de pozo de la empresa Agrolmos.

Para lograr este objetivo se combinó cuatro niveles de flujo de alimentación (35, 38, 41, y 44 m³/hr) y cuatro niveles de caída de presión (40, 45, 50 y 55 psi) y se realizó tres repeticiones de cada combinación. Los ajustes se realizaron con el sistema de registro en línea dese un controlador lógico programable (PLC). Cada ensayo se programó para un tiempo de 20 minutos, durante los cuales se tomaron tres alícuotas de un litro cada 5 minutos para su posterior análisis. Los análisis realizados fueron: conductividad y contenido de sílice (ppm). Con los valores registrados de flujo de alimentación y flujo de permeado se calculó el porcentaje de recuperación del sistema de ósmosis inversa.

Con los grupos formados por la combinación de flujos y presiones se realizaron los análisis factoriales de varianza de la conductividad, contenido de sílice y porcentaje de recuperación.

Se estableció que existe influencia significativa de las variables independientes ensayadas (flujo y presión) sobre el contenido de sílice, conductividad y porcentaje de recuperación. El mayor efecto lo ejerce el flujo, y en menor proporción la caída de presión.

De las 16 combinaciones ensayadas, la única que no cumple con el nivel máximo de sílice o el nivel mínimo de recuperación, es la combinación de 44 m³/hr y 35 psi.

Para cumplir con el flujo y la calidad de agua requerida para alimentar a la caldera de alta presión de la Empresa Agroindustrial Olmos, y no consumir demasiada energía se recomienda que se debe trabajar con 38 m³/hr de flujo y una caída de presión de 45 psi.

Palabras claves: sílice, osmosis inversa.

ABSTRACT

Taking into account that silica is the number one enemy of industrial processes since it causes all kinds of problems in high pressure boilers and turbine blades, in this investigation the effect of volumetric flow and pressure variation on the content of silica in the permeate during the reverse osmosis process of well water from the company Agrolmos.

To achieve this objective, four levels of feed flow (35, 38, 41, and 44 m³ / hr) and four levels of pressure drop (40, 45, 50 and 55 psi) were combined and three repetitions of each combination were performed. The adjustments were made with the online registration system from a programmable logic controller (PLC). Each trial was scheduled for a time of 20 minutes, during which three aliquots of one liter were taken every 5 minutes for further analysis. The analyzes carried out were: conductivity and silica content (ppm). With the recorded values of feed flow and permeate flow, the recovery percentage of the reverse osmosis system was calculated.

With the groups formed by the combination of flows and pressures, the factorial analysis of the variance of conductivity, silica content and recovery percentage were carried out.

It was established that there is significant influence of the independent variables tested (flow and pressure) on the silica content, conductivity and recovery percentage. The greatest effect is exerted by the flow, and to a lesser extent, the pressure drop.

Of the 16 combinations tested, the only one that does not meet the maximum silica level or the minimum recovery level is the combination of 44 m³ / hr and 35 psi.

To comply with the flow and water quality required to feed the high pressure boiler of the Agrolmos Company, and not to consume too much energy, it is recommended to work with 38 m³ / hr of flow and a pressure drop of 45 psi.

Keywords: silica, reverse osmosis.

INTRODUCCION

El desarrollo de centrales de energía modernas con nuevos tipos de calderas ha dado lugar a presiones de funcionamiento más elevadas. Esto es lo que ocurre en las centrales de energía que se han esforzado por obtener una eficacia de hasta un 50 % o superior. Además, por cada aumento de la eficacia del 1 %, se da una disminución del 3% en las emisiones.

La sílice genera una capa en las superficies de difícil eliminación – incluso con ácido – que puede dar lugar a la pérdida de eficacia de los procesos térmicos. Una capa de tan solo 0,1 mm puede reducir la transferencia térmica en torno a un 5 %. Cuando el vapor atraviesa la turbina, entra en contacto con los álabes y se enfría; como consecuencia, la sílice disuelta en el vapor se deposita en los álabes. En el peor de los casos, esto puede dar lugar a la paralización de la central para reparar o sustituir los álabes. Gracias a la experiencia, la industria ha determinado las concentraciones de SiO_2 permitidas para evitar daños en las turbinas. A una presión de funcionamiento de 180 bares, el agua de la caldera no debe contener más de 100 ppb de SiO_2 para que el vapor contenga un máximo de 5 ppb de SiO_2 , asumiendo que la caldera se encuentre en un estado idóneo (Hach Lange, 2013).

El tratamiento externo para la prevención de incrustaciones puede incluir reducción de sólidos en suspensión por filtrado, reducción de durezas por ablandamiento a la cal, ablandamiento por zeolita, equipo de intercambio de iones, desmineralizadores, evaporadores y desaireadores para eliminación de gases y oxígeno. Este sistema de tratamiento tradicional no asegura un

contenido de sílice en los límites menores a 100 ppb, con la consecuencia de crear incrustaciones en las tuberías de calderas y alabes de turbina (Ortiz y Tavera, 2013).

En la actualidad, para asegurar un contenido mínimo de sílice en el agua de calderas está utilizando la tecnología de membranas u osmosis inversa. El buen funcionamiento de un sistema de osmosis inversa depende de varios factores como temperatura, presión, flujo, contenido de sólidos disueltos, tipo de membrana (Ramírez, 2010). En el presente trabajo se establece como objetivo principal determinar el efecto de del flujo volumétrico y variación de presión sobre el porcentaje de sílice en el permeado durante el proceso de osmosis de inversa de agua de pozo de la empresa Agrolmos. Por lo que los objetivos específicos son: establecer las presiones y flujos volumétricos que se pueden ajustar en el equipo de osmosis inversa de la empresa Agrolmos, determinar si existe efecto de la variación de la presión y flujo volumétrico sobre el porcentaje de sílice en el permeado, y determinar la presión y flujo volumétrico aceptable que produzca el menor contenido de sílice.

Las concentraciones excesivas de SiO_2 en las calderas pueden afectar negativamente a la eficacia de las centrales de energía; por tanto, es lógico que este parámetro deba monitorizarse con detenimiento. Además de la pérdida de energía, los depósitos de sílice en los alabes de turbina trae consigo reparaciones costosas. Por lo tanto es importante determinar la presión y flujo adecuado para el equipo de osmosis inversa de la empresa para tener ahorros significativos en energía y mantenimiento.

I. MARCO TEORICO

1.1 ANTECEDENTES DE ESTUDIO

Gallego, et al., (2009) presentaron su informe técnico “Evaluación de diferentes estrategias para la optimización de la operación en sistemas de ósmosis inversa con altas concentraciones de sílice (SiO_2) en la planta desaladora de Arica (Chile)”. Los autores sostienen que, debido a la escasez de agua de buena calidad en muchas regiones del planeta, las instalaciones de ósmosis inversa (OI) están viéndose obligadas a operar con concentraciones de sílice muy elevadas. La química de la sílice es muy compleja y puede encontrarse en la superficie de las membranas bien en forma cristalina o polimérica, a la vez que puede llegar formada a estos sistemas en forma coloidal. En su investigación indican que la solubilidad de la sílice es de 120-150 mg/l a 25°C y $\text{pH} < 8$, un valor muy inferior a la concentración de diseño de sílice en el rechazo (196 mg/L). La presencia de hierro en el agua favorece la formación de silicatos de hierro mientras que la relación magnesio/calcio, presencia de manganeso, bario o aluminio son factores que se relacionan con la catálisis de la reacción de polimerización de la sílice. La recomendación habitual en estos sistemas ha sido operar con concentraciones máximas de sílice en el concentrado de 120-150 mg/L dependiendo del pH y temperatura, aunque existen plantas operando con concentraciones de sílice en rechazo superiores a 180 mg/L en determinadas condiciones de operación.

Koo, Lee y Sheikholeslami (2011), presentaron su investigación “Incrustaciones de sílice y su limpieza de las membranas de osmosis inversa”. Los autores indican que La desalinización juega un papel importante en la producción de agua pura a partir de agua salobre. La ósmosis inversa (RO) es,

con mucho, la forma más efectiva de eliminar la sílice coloidal y disuelta, que se puede encontrar en altas concentraciones en agua salobre. En su estudio examinan los efectos de la polimerización de sílice en presencia de cationes y aniones polivalentes en sistemas de OI. Los investigadores utilizaron metasilicatos de sodio de grado comercial como fuente de sílice. El experimento se configuró de manera que simulara las condiciones que se encontrarían en una planta de desalinización. La polarización de concentración (C / P) en el sistema se determinó experimentalmente con una técnica simple. Además, se llevaron a cabo pruebas para examinar el mecanismo de ensuciamiento real en unidades de ósmosis inversa en diversas condiciones experimentales. Además, se examinó el efecto de la limpieza, con agua destilada y con pulsaciones, así como con los productos de limpieza disponibles. Algunos limpiadores disponibles en el mercado fueron capaces de restaurar parcialmente el flujo. Recomiendan realizar investigaciones adicionales para examinar la efectividad de los nuevos inhibidores específicos de sílice.

Lezcano y Rosales (2013), sustentaron tesis “Efecto de la variación del porcentaje de recuperación sobre el contenido de sílice en el permeado y rechazo RO”. Los autores estudiaron el efecto que causa la variación del porcentaje de recuperación sobre el contenido de sólido en el permeado (producto) y en el rechazo (subproducto) de osmosis inversa. Las variables de estudio sobre la variación del porcentaje de recuperación fueron: el contenido de sílice en el rechazo de osmosis inversa. Para el manejo de estos parámetros, utilizaron un equipo de osmosis inversa cuyo capacidad nominal fue de 60 m³/h, el equipo disponía de 60 membranas, arranque con variación y automatismo con PLC. Los resultados obtenidos muestran que el incremento del porcentaje de

recuperación disminuyó el contenido de sílice en el permeado e incrementa el contenido de sílice en el rechazo. El permeado, con bajo contenido de sílice, será utilizado como agua de alimentación en una caldera de alta presión en la generación de vapor para turbinas.

Herrera (2017), sustentó su tesis “Optimización de parámetros operacionales en unidad de Osmosis Inversa”. La autora optimizó el sistema de osmosis inversa aplicada al agua de calderas de una empresa de Generación de Electricidad, para lo cual realizó la investigación durante un mes, tomando diferentes datos y evaluando el efecto de la presión, de la temperatura, concentración de sales y pH sobre el flujo y rechazo de sales. En cada determinación realizó caracterizaciones físico químicas del agua de permeado o producto. Todos los resultados fueron debidamente tabulados. Se determinó que a medida que aumenta la presión, aumenta el caudal del permeado y el rechazo de sales es mayor manteniendo una temperatura constante. A medida que a la temperatura de alimentación aumenta, el caudal aumenta y el rechazo de sales disminuye manteniendo presión constante. Conforme aumenta la concentración de sales en flujo, tanto el caudal como el rechazo de sales disminuye, manteniendo temperatura constante. A medida que aumenta el pH, el caudal y el rechazo de sales permanecen constantes. Concluye que el aumento de presión, temperatura y caudal es esencial para el óptimo funcionamiento de la unidad de osmosis inversa. A través de esta investigación, de los resultados y cálculos obtenidos se llegó a determinar que el máximo porcentaje de rechazo de sales fue de 96,32% con valores de presión = 25 kg/cm², temperatura T = 25°C y un caudal de permeado Q = 1,47 m³/hr.

1.2 BASE TEORICA CIENTIFICA

1.2.1 EMPRESA AGROINDUSTRIAL AGROLMOS.S.A.

Agrolmos S.A. es un proyecto que contempla actividades agroindustriales con el objetivo de fabricar y comercializar azúcar a partir del cultivo de caña. Proyecta Habilitar más de 13,500 hectáreas de caña de azúcar con riego tecnificado, su capacidad de molienda será de 5,600 toneladas diarias en una primera etapa, para producir 600 toneladas de azúcar rubia, destinada tanto al mercado interno como al exterior. En una segunda etapa la capacidad de molienda diaria alcanzaría las 10,000 toneladas de caña, para producir 1,071 toneladas de azúcar por día.

Ubicado entre los valles de los ríos Cascajal y Olmos en el departamento Lambayeque, Provincia Lambayeque, distrito de Olmos; Agrolmos proyecta ser el más moderno y eficiente ingenio azucarero del país en operatividad tecnológica para este tipo de industria, con menos uso de agua en sus procesos productivos, autogenerando su propia energía, cuyos excedentes pueden ser comercializados a la red eléctrica, y con un equipamiento de vanguardia que reemplazará a los tradicionales trapiches, para garantizar una mejor extracción de jugo de la caña y un alto rendimiento al final del proceso.

Con el uso de tecnología los resultados en el manejo agronómico son altamente positivos. La siembra mecanizada se realiza a través de maquinaria guiada por GPS y en el sistema de riego tecnificado por aspersión se utilizan pivotes circulares de 1,000 metros de diámetro, los cuales abarcan el riego de 95 hectáreas cada uno, logrando optimizar el manejo del recurso hídrico.

El plan de riego de Agrolmos se monitorea desde una pantalla y se programa pivote a pivote desde un ordenador, facilitando al equipo la velocidad de desplazamiento, la cantidad de horas de riego y el nivel de fertilización.

Otro beneficio que ofrecerá el proyecto es que la planta de procesamiento, ubicada en el centro de los campos de cultivo, permitirá reducir costos en el transporte de caña del campo a la fábrica.

1.2.1.1 PLANTA DE OSMOSIS INVERSA DE LA EMPRESA AGROLMOS

La planta de osmosis inversa fue instalada en el año de 2017, está ubicada en la parte posterior de la casa de proceso de azúcar, cuenta con un área de 150 m², teniendo una capacidad estimada de permeado de 25 m³/h para los procesos del ingenio azucarero.

El agua de alimentación para la planta de osmosis inversa es agua de pozo, para la cual se ha considerado 2 filtros de zeolita de operación automática con el objetivo de minimizar el problema de partículas en suspensión presentes en el agua de pozo.

Para el diseño de la unidad desmineralizadora se consideró una calidad de alimentación de 590 ppm TDS.

Para éste proyecto en particular se considera además el suministro de un sistema de desmineralización mediante ósmosis Inversa. La unidad de ósmosis Inversa cuenta con un filtro pulidor de cartuchos, una bomba de alta presión, instrumentación, tubería de interconexión y su equipo de limpieza química (tanque de limpieza, bomba de transferencia y un filtro bolsa de limpieza) y está diseñada para la operación automática local mediante un controlador. La unidad de OI cuenta además con un sistema de dosificación de inhibidor de incrustaciones.

1.2.2 OSMOSIS INVERSA

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 (como iones).

La osmosis inversa ofrece la filtración más fina actualmente disponible, rechazando la mayoría de los sólidos disueltos y suspendidos, al tiempo que

impiden el paso de las bacterias y los virus, obteniéndose un agua pura y esterilizada.

Aguas con un elevado contenido de sales como, sodio, calcio, boro, hierro..., cloruros, sulfatos, nitratos y bicarbonatos..., pueden ser tratados con la osmosis inversa hasta alcanzar los límites considerados como “agua aceptable” para su utilización.

Las membranas filtrantes son la clave y responsables de separar las sales del agua. Dichas membranas 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. La elección del modelo de membrana más apropiado es según el agua a tratar y su empleo posterior, determinando el tipo de instalación más idónea.

Las suciedades que quedan en las membranas son posteriormente arrastradas y lavadas por la misma corriente de agua. De esta forma el sistema realiza una autolimpieza constante. Esta corriente de agua de desperdicio necesaria, está en relación directa con el tipo de membrana que se utiliza y sus exigencias (Ortega, 2011).

1.2.2.1 El principio de funcionamiento.

Para entender el proceso de ósmosis inversa, empecemos por 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 soluciones 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. Como regla fundamental de la naturaleza, el sistema tratará de alcanzar el equilibrio. Esto significa que tratará de alcanzar la misma concentración a ambos lados de la membrana. La única forma posible de alcanzar el equilibrio es que el agua pase del compartimiento de agua pura al compartimiento de concentración salina, para diluir la solución salina.

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. Figura 1.

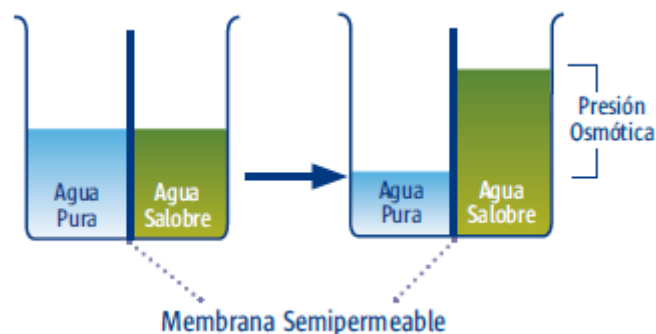


Figura 1. Proceso de Ósmosis
Fuente: <http://www.hidrotec.cl/PDF/ficha4.pdf>

De aquí 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.

Cuando se logra invertir el fenómeno estamos en presencia de ósmosis inversa o invertida como se ha dado en llamarla. Figura 2.

En resumen: si a una corriente de agua salada se le aplica una fuerte

presión, lograremos 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 (minerales, materia orgánica, etc.) y de microorganismos (virus, bacterias, etc.): producto o permeado.
- La otra se va concentrando en esos mismos productos sin que lleguen a depositarse en la membrana, porque la taparían y se eliminarían en forma continua, constituyendo el concentrado (Pure Aqua, Inc., 2012).

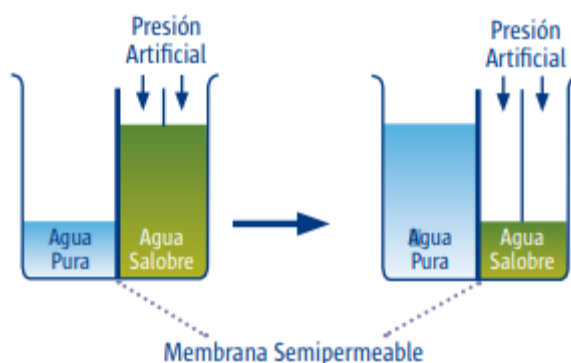


Figura 2. Proceso de Osmosis Inversa
Fuente: <http://www.hidrotec.cl/PDF/ficha4.pdf>

En la práctica, la osmosis inversa se aplica como un proceso de filtración de flujo cruzado. El proceso simplificado se muestra en la Figura 3.

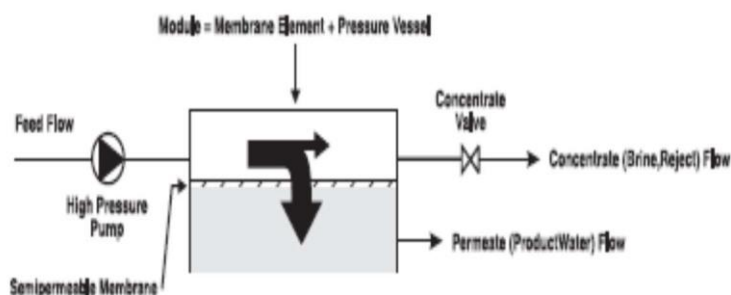


Figura3. Proceso de osmosis inversa (Wagner, 2001)

Con una bomba de alta presión, el agua de alimentación es continuamente bombeada a presión elevada al sistema de membranas. Dentro del sistema de membranas, el agua de alimentación será dividida en una corriente producto purificada o baja en sales, llamada permeado, y una corriente altamente salina o concentrada en sales, llamado concentrado o rechazo. Una válvula reguladora de flujo, llamada válvula de concentrado, controla el porcentaje de agua de alimentación que está saliendo en la corriente de concentrado y el permeado que se obtendrá de la alimentación.

1.2.2.2 La membrana de la Ósmosis Inversa

Es una membrana que tiene un área “microporosa” que rechaza las impurezas y que no impide el paso del agua. La membrana rechaza las bacterias, pirógenos, y 85%-95% de sólidos inorgánicos. Los iones “polivalentes” son rechazados más fácilmente que los iones “monovalentes”. Los sólidos orgánicos con un peso molecular superior a 300 son rechazados por la membrana, pero los gases pasan a través. La ósmosis inversa es una tecnología de rechazo en porcentaje. La pureza del agua producida depende de la pureza del agua alimentada. La pureza del agua producida por la ósmosis inversa es más grande que en el agua de alimentación. Figura 4.

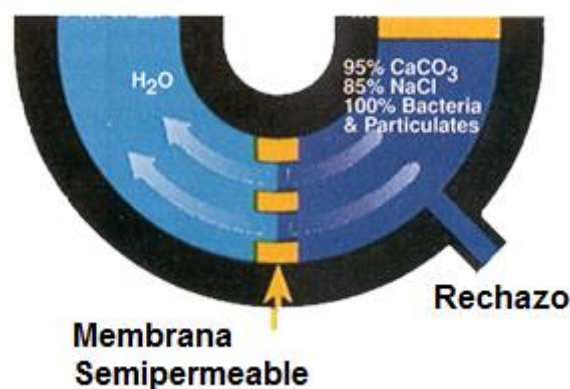


Figura 4. Rechazo de la Ósmosis Inversa

1.2.2.3 Agua Rechazada

Un gran porcentaje (50-90%) del agua de alimentación no pasa por la membrana, pero corre del otro lado, limpiando el agua continuamente y trayendo los sólidos inorgánicos y orgánicos para drenarlos. Esa agua se llama agua “rechazada”.

1.2.2.4 Factores del agua de alimentación que afectan la membrana.

Los factores del agua de alimentación que afectan la membrana (Reverter & Santi, 2015).

- **Presión.** La presión del agua de alimentación afecta la cantidad y la pureza del agua producida por la ósmosis inversa. Baja presión del agua de alimentación causa baja corriente y baja pureza. Para un sistema de membrana y unas condiciones de operación dadas, la presión de alimentación requerida depende primariamente de la concentración de sólidos disueltos (TDS) y de la temperatura del agua de abastecimiento – menores niveles de TDS y aguas más calientes requieren presiones de alimentación más bajas para producir cantidades y calidades similares de permeado.
- **pH.** Determinar la variedad del pH en agua de alimentación es muy importante. Es recomendado de usar una variedad más amplia de membranas cuando el agua de alimentación es básica, ácida o inestable.
- **Índice de Saturación de Langelier** (Langelier Saturation Index - LSI). El LSI indica el principio de la formación de una incrustación o sarro sobre el área de la membrana. El LSI se calcula con la temperatura, el total de sólidos inorgánicos, la dureza alcalina, y pH del agua de alimentación. Si el índice LSI es positivo, se recomienda instalar un

suavizador de agua ante del sistema de ósmosis inversa.

El índice de saturación de Langelier se calcula usando la siguiente ecuación:

$$LSI = pH - pH_a$$

Donde:

$$pH_a = (9,30 + A + B) - (C + D)$$

$$A = (\log_{10} [TDS] - 1) / 10, \text{ donde TDS en ppm}$$

$$B = -13.12 \times \log_{10} (^{\circ}C + 273) + 34.55$$

$$C = \log_{10} [Ca^{2+} \text{ como } CaCO_3] - 0.4, \text{ en ppm de } CaCO_3$$

$$D = \log_{10} [\text{alcalinidad como } CaCO_3], \text{ ppm de } CaCO_3$$

Si el LSI es mayor que 0, el agua tiene tendencia a formar incrustación de carbonato de calcio. Si el LSI es igual a 0, el agua está en balance químico. Si el LSI es menor que 0, el agua es corrosiva. Un valor positivo indica que es recomendable un pre-tratamiento en forma de ablandamiento (con lechada de cal o intercambio iónico), o cuando se requiere el uso de anti-incrustante o ácido.

- **Cloro Libre (TFC) y Bacterias.** Las membranas de acetato de celulosa necesitan una limpieza constante de TFC para impedir la propagación de bacterias y que se dañe la membrana. En contraste, la poliamida y las membranas finas, como cintas, son dañadas por el TCF. El carbón activado es usado para remover el TCF cuando la poliamida y las membranas finas lo necesitan.
- **Temperatura.** La duración de la membrana se basa sobre la temperatura del agua de alimentación que debe ser de 25°C. Por cada 1°C bajo 25°C, la cantidad de la producción del agua es reducida por

3%. Cuando el agua de alimentación se tiende a quedarse regularmente bajo 25°C, es recomendado que el agua caliente y fría se mezclen para que la temperatura suba a 25°C. El agua de alimentación que tiene una temperatura superior a 35°C dañara la mayoría de las membranas.

- **Índice de Densidad Silt** (Silt Density Index – SDI). También llamado índice de densidad de lodos, el SDI es una medida que sirve a medir las partículas de submicrones que tienen tendencia a bloquear las membranas. La corriente del agua a una presión específica es filtrada a través una membrana en forma de disco y que es recuperada durante un periodo de tiempo fijo. La rapidez de la corriente del agua y el volumen total recogido determina el índice.

Los fabricantes de membranas requieren que el SDI15 sea menor que 5 %, para encontrar condiciones de garantía. Sin embargo, aunque el SDI puede ser menor que 5%, el agua puede todavía ser capaz de ensuciar las membranas. En la práctica, un SDI menor a 3% es usualmente necesario para reducir el potencial de ensuciamiento a un nivel aceptable.

- **Turbidez.** La turbidez es la medida que sirve para detectar las partículas suspendidas. Se debe tomar en cuenta que el SDI y la turbidez están poco relacionadas. En general, a más alta turbidez, se tendrá más alto SDI. Sin embargo, baja turbidez (<1 NTU) no, en cambio, implica bajo SDI (< 5).

1.2.2.5 Aplicaciones de la Osmosis Inversa

Las principales aplicaciones de las membranas de RO incluyen: desalinización; remoción/reducción de subproductos de la desinfección (DBP), dureza, color, contaminantes inorgánicos, compuestos orgánicos sintéticos y volátiles, patógenos; y recuperación de aguas residuales para reuso.

Se debe tener en cuenta que, aunque las membranas RO/NF también pueden remover sólidos suspendidos y material particulado, cualquier carga de ese tipo puede dañar (obstruir) rápidamente (y algunas veces irreversiblemente) las membranas semipermeables ya que estas no son porosas y por tanto no son capaces de retrolavado. Por tanto, aunque RO (y NF) podría reducir los niveles de material particulado (es decir, turbiedad, conteo de partículas, etc.), la tecnología no es aplicada específicamente para este propósito, y pre-tratamiento para remover este material aguas arriba de las membranas es siempre aplicado.

Las membranas de ósmosis inversa han sido usadas ampliamente para el tratamiento de agua como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1.

Aplicaciones de la Osmosis Inversa en Tratamiento de Agua

Uso industrial	Agua potable	Reúso y tratamiento de aguas residuales.
Agua ultra pura, agua de calderas, agua pura para procesos y uso diario en industrias	Desalinización de agua de mar y agua salobre	Agua industrial, agua de agricultura, agua potable indirecta.

Fuente: Diseño y Soluciones Sostenibles S.A. http://dss.com.ec/wp-content/uploads/2012/07/osmosis_inversa.pdf

Desalinización

La desalinización del agua de mar es la producción de agua potable o de calidad industrial, dulce, de baja salinidad, a partir de una fuente de agua salada (agua de mar, bahía u océano) por medio de separación con membrana o evaporación (destilación por calor).

Entre las tecnologías de desalinización disponibles hoy, la ósmosis inversa es considerada el proceso de desalinización más económico. La desalinización de agua de mar con RO tiene ventajas en las áreas de ahorro de energía, más bajo costo de capital, menor tiempo de arranque y parada, menor periodo de construcción, menos espacio de instalación y menor costo total del agua.

Agua ultra pura

Las tecnologías basadas en membranas se han convertido en el estándar de la industria para los sistemas de agua ultra pura en las industrias de semiconductores, farmacéuticas y de generación de potencia eléctrica.

1.2.2.6 Sistema Típico de Ósmosis Inversa

Un sistema típico con membranas de ósmosis inversa consiste en tres subsistemas separados: pre-tratamiento, el proceso de membrana y el pos-tratamiento.

Esencialmente todas las fuentes de agua donde se usan sistemas de membranas RO (y NF: nanofiltración) deben someterse a ciertos niveles de pre-tratamiento el cual busca preservar la integridad de las membranas, maximizando su eficiencia y durabilidad. Los procesos de pre-tratamiento usualmente involucran la adición de ácidos, inhibidores de incrustación, o ambos, para prevenir la precipitación de sales poco solubles, seguido de una

etapa de filtración (por cartucho) de 5 a 20 μm para prevenir la obstrucción por partículas. Otros pre-tratamientos adicionales (típicamente aguas arriba del filtro) se pueden requerir para agua con alto potencial de obstrucción, tales como agua de superficie. El pos-tratamiento puede incluir muchas unidades típicas de un sistema convencional de tratamiento de agua potable, tales como aireación, desgasificación, ajuste de pH, adición de químicos contra la corrosión, fluorización, y desinfección (Figura 5).

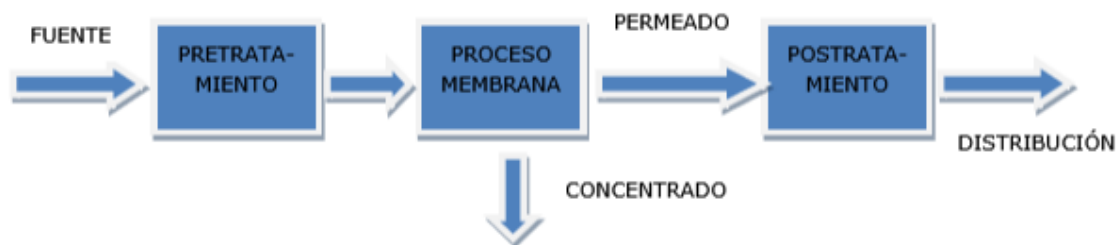


Figura 5. Sistema típico de Osmosis Inversa (Cornell Cooperative Extension, 2005)

El pos-tratamiento puede incluir muchas unidades típicas de un sistema convencional de tratamiento de agua potable, tales como aireación, desgasificación, ajuste de pH, adición de químicos contra la corrosión, fluorización, y desinfección. Un entendimiento completo de las características de la fuente de agua y las metas de calidad de agua es esencial para el exitoso diseño y operación de una planta de tratamiento con RO/NF, porque los contaminantes presentes en la fuente de agua determinan la combinación de pre- y pos-tratamiento que serán necesarias.

1.2.2.7 Obstrucción de las membranas

La obstrucción de membranas, llamado también ensuciamiento, es un resultado de la deposición de sólidos suspendidos, orgánicos y microbios en la superficie de la membrana, típicamente en el lado de

abastecimiento/concentrado. Una membrana obstruida presenta dos problemas principales de desempeño: presión de operación más alta de lo normal (para compensar el menor flujo de la membrana a presión constante) y una caída de presión más alta de lo normal. Las causas de obstrucción de una membrana RO son:

- Depósito de cieno (limo) u otros sólidos suspendidos que han sido inadecuadamente removidos por el pre-tratamiento
- Incrustaciones inorgánicas causadas por la precipitación de sales poco solubles o sílice.
- Obstrucciones biológicas causadas por el excesivo crecimiento microbiano
- Interacción de orgánicos con la membrana (obstrucción química)

La bio-obstrucción ha sido considerado uno de los problemas más serios en la operación de las plantas de RO (especialmente desalinizadoras de agua de mar). El método usual para prevenirlo es la dosificación continua de cloro en la toma de agua. Sin embargo, esto crea un nuevo problema por la poca/nula tolerancia de las membranas de RO al cloro. Se considera que la obstrucción química es causada por la adsorción de materiales orgánicos tales como sustancias húmicas y surfactantes en el agua de abastecimiento o en la superficie de la membrana.

La Tabla 2 muestra las directrices de calidad de agua generalmente aceptadas para minimizar la obstrucción de la membrana de RO. Además del carbonato de calcio, hay otros compuestos basados en calcio que pueden incrustar las membranas RO. Estos compuestos son sulfato de calcio, fosfato de calcio y fluoruro de calcio.

Los fosfatos de calcio se convierten en un problema con el uso de aguas de superficie y en el tratamiento de aguas residuales para reuso. Para el ortofosfato de calcio se aceptan concentraciones de 0,5 ppm.

El fluoruro de calcio puede incrustar cuando la concentración de fluoruro es tan baja como 0,1 ppm si la concentración de calcio es alta (Kang y Cao, 2012).

Adicionalmente a lo establecido en la Tabla 2, la exposición de las membranas de poliamidas a una gran variedad de compuestos orgánicos puede resultar en hinchazón o disolución de la capa de soporte poroso de polisulfona. Los químicos sospechosos incluyen:

- Solventes
- Compuestos aromáticos: benceno, tolueno, diesel, gasolina, xileno, fenol
- Otros: cetonas, aldehídos, esterres, éteres fuertes

Los aceites (hidrocarburos o con base de silicona) y grasas no deben contaminar el agua de alimentación al sistema RO a niveles superiores a 0,1 mg/L.

Tabla 2

Directrices de calidad de agua generalmente aceptadas para minimizar obstrucción de la membrana de Osmosis Inversa (Kang & Cao, 2012).

Sustancia	Medida	Valor
Sólidos suspendidos	Turbiedad	< 1 NTU
Coloides	SDI	< 5
Carbonato de calcio	LSI	< 0
Metales: hierro, manganeso, aluminio	ppm	< 0,05
Bario, estroncio	ppm	< 0,05
Sulfuro de hidrógeno	ppm	< 0,1
Microbios	Filtración con membrana	< 1.000 UFC/ml
Orgánicos	Concentración COT*	< 3 ppm
Color	Unidad de color	< 3 APHA

Demanda Química de Oxígeno, DQO	Ppm	< 10
pH	Unidades de pH	4-6 membranas CA 2-12 membranas PA
Cloro libre	Ppm	< 1 membranas CA < 0,02 membranas PA
Temperatura	°C	< 30 membranas CA < 45 membranas PA

***COT: carbono orgánico total**

Fuente: elaborada por el autor

Una membrana sucia muestra dos detalles principales de rendimiento: Una presión más alta que la presión de operación normal (para compensar el bajo flux de membrana a presión constante) y más alto que la caída de presión normal. A medida que las sustancias responsables de ensuciamiento se acumulan sobre la superficie de la membrana, estas forman una capa de barrera adicional para transporte a través de la membrana. Esta barrera adicional requiere una gran fuerza motriz que se traduce en una alta presión de operación. Altas caídas de presión es el resultado de una resistencia aumentada al flujo cruzado causado por la capa de sustancias ensuciantes.

La caída de presión se traduce en presión axial sobre el módulo de membrana. Si la caída de presión llega a ser suficientemente alta, la presión axial sobre el módulo de membrana puede ser suficientemente grande para causar fallas en la membrana y el módulo. Las fallas pueden manifestarse como rupturas en el exterior de la carcasa del módulo y membranas telescópicas y espaciadores. (a) membrana telescópica y espaciadores (b) debido a caída de presión excesiva (Ver Figuras 6a y 6b).

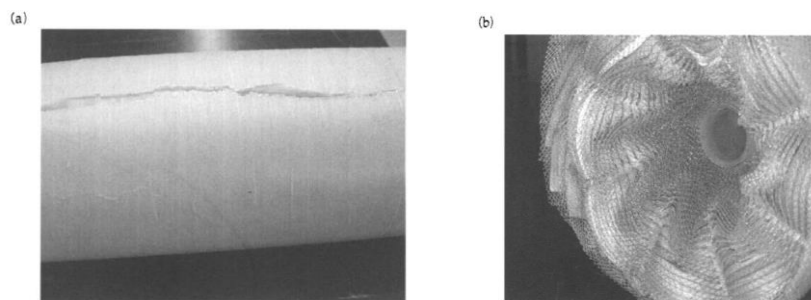


Figura 6. Daños en las membranas ocasionadas por caída de presión excesiva (Tejedor, 2008)

1.2.2.8 Incrustaciones de una membrana de Osmosis Inversa

La incrustación de una membrana RO es el resultado de la precipitación de sales saturadas sobre la superficie de la membrana. Una membrana incrustada presenta tres problemas principales de desempeño: presión de operación más alta de lo normal (para compensar el menor flujo de la membrana a presión constante), una caída de presión más alta y un menor rechazo de sales de lo esperado. La Tabla 3 muestra las directrices de calidad de agua generalmente aceptadas para minimizar la incrustación de la membrana de RO.

Tabla 3

Directrices de calidad de agua generalmente aceptadas para minimizar la incrustación de la membrana de Osmosis Inversa (Kang & Cao, 2012).

Sustancia	Medida	Valor
Sílice	Ppm	200
Bario, Estroncio	Ppm	< 0,05
Calcio	LSI	< 0

Fuente: elaborado por las autoras

La incrustación es exacerbada por el flux de la membrana y la baja velocidad de flujo cruzado, en la misma forma como el ensuciamiento de la membrana se incrementa.

Alto flux trae más soluto dentro de la polarización de concentración en la capa límite. Si la concentración de solutos en la capa límite alcanzan la saturación, estos solutos incrustarán la membrana. Baja velocidad de flujo cruzado corresponde a una capa límite gruesa. Esto incrementa el tiempo de residencia para el soluto dentro de la capa límite, incrementando la oportunidad de que la saturación se alcance y se forme incrustación.

Para determinar el potencial para que una sal forme incrustación, el producto iónico de la sal en cuestión (tomada de la corriente de rechazo) se compara con el producto de solubilidad para sal bajo las condiciones de rechazo. La siguiente ecuación define el producto iónico a cualquier grado de saturación:

$$IP: [\text{catión}]^a [\text{anión}]^b$$

Donde:

IP = Producto iónico

[Catión] = Concentración de catión

[Anión] = Concentración de anión

Superíndices:

a = Cantidad de catión presente dentro de la sal

b = Cantidad de anión presente dentro de la sal.

El producto de solubilidad a saturación:

$$K_{sp} = [\text{catión}]^a [\text{anión}]^b$$

Donde:

K_{sp} = Producto de solubilidad

[Catión] = Concentración de catión

$$[\text{Anión}] = \text{Concentración de anión.}$$

En general, la incrustación se formará cuando producto iónico se más grande que el producto de solubilidad, es decir $IP > K_{sp}$.

1.2.3 TIPOS DE MEMBRANAS PARA OSMOSIS INVERSA

El desempeño de los sistemas de los sistemas de RO está caracterizado por dos parámetros: flujo de permeado y rechazo de sales. Este desempeño depende del material y estructura de la membrana.

1.2.3.1 Materiales de Membranas

Los materiales más comunes son el acetato de celulosa (y sus derivados) y las poliamidas aromáticas (referidos como compuestos de película delgada). La Tabla 4 muestra un resumen general de las ventajas y desventajas claves de las membranas de celulosa y de película de delgada, aunque debe tenerse presente que las propiedades y características varían según el fabricante y la membrana específica.

Tabla 4

Comparación de las membranas de poliamidas y de acetato de celulosa (Saleh & Gupta, 2012).

PARAMETRO	MEMBRANA DE POLIAMIDA	MEMBRANA DE ACETATO DE CELULOSA
Rechazo de sales	Más alta (> 95%)	Más baja (hasta 95%)
Rechazo de sílice	>96%	≈ 85%
Presión neta	Más baja (10 - 15 bar)	Más alta (15 – 30 bar)
Carga en la superficie	Más negativa (limita el uso de coagulantes catiónicos en el pretratamiento)	Neutral (no limitaciones en pretratamiento con coagulantes)
Tolerancia al cloro	Pobre (hasta 1000 ppp-h) Más alta (semanas a meses) Alto (SDI < 4)	Aceptable (uso de 1-2 ppm de cloro) Más baja (meses a años)

Frecuencia de lavado			Más bajo (SDI < 5)
Requerimiento de pretratamiento		Aceptable	Buena
Tolerancia a la obstrucción		Alta	Relativamente más baja
Remoción de orgánicos		Más susceptible	Menos susceptible
Bio-obstrucción		Ninguna	Más alta
Biodegradación		Alta (2 – 13)	Limitada (4- 8)
Tolerancia al pH		Alta(2-13)	Limitada(4-8)
Temperatura		Alta (2-13)	Limitada(4-8)
		Hasta 30°C	Hasta 45°C

Fuente: elaborado por las autoras

Principalmente debido a las mejores características de rechazo y a las menores presiones de trabajo, las membranas compuestas de película delgada (membranas de poliamidas) 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 pre-tratamiento necesario.

a) Membranas de acetato de celulosa

Las características predominantes de las membranas de acetato de celulosa (CA, Cellulose Acetate) son:

- La morfología relativamente lisa de la superficie de la membrana ofrece alguna protección contra la obstrucción ya que no hay espacios muertos en la membrana donde los

materiales incrustantes pueden ser atrapados.

- La carga neutra de la superficie minimiza el potencial de obstrucción con polímeros catiónicos que puedan ser arrastrados desde el pre-tratamiento.
- Capacidad de tolerar hasta 1 ppm de cloro libre de forma continua ofrece alguna protección contra el crecimiento biológico en la membrana. Esto es particularmente importante porque los polímeros de CA en sí mismos suministran nutrientes para la población microbiana, que a su vez metabolizan el polímero y degradan la membrana.
- La temperatura está limitada a 35°C.
- El pH de operación está limitado de 4 a 6.
- La presión de operación está en el rango de 200 a 400 psi (presiones superiores pueden producir la compactación de la membrana, aplastándola y haciendo por tanto más densa).
- El rechazo de sales varía según se use una membrana “estándar” o una membrana de alto “rechazo”. El rechazo de sílice es solamente del 80%.

b) Membranas de Poliamida (PA) Compuesta

Las membranas compuestas, algunas veces llamados “compuestos de película delgada” son esencialmente una combinación de dos polímeros fundidos sobre un soporte de tela. Las características predominantes de las membranas compuestas de poliamida son:

- La morfología de la superficie es desigual, ofreciendo muchas áreas donde los materiales incrustantes pueden ser atrapados

y mantenidos por la membrana.

- La carga de la superficie es negativa y por tanto atrae los polímeros cationicos que puedan ser arrastrados desde el pre-tratamiento.
- No pueden tolerar el cloro libre ni ningún otro oxidante. Algunos fabricantes establecen un límite de exposición de 200-1.000 ppm-hora para la perdida de la capacidad de rechazo de la membrana.
- La temperatura está limitada a 45°C.
- El rango de pH de operación es de 2 a 11 aunque puede variar con el fabricante.
- La presión de operación está en el rango de 150 a 400 psi.
- El rechazo de sales y de sílice es mucho más alto que en las membranas CA.

1.2.3.2 Módulos de Membranas

Las formas básicas de los módulos de membrana son:

- Placa y Marco
- Tubular
- En espiral
- Fibra fina hueca

La Tabla 5 compara brevemente estas cuatro configuraciones.

Tabla 5

Comparación de los módulos básicos de membrana para osmosis inversa (Li & Wang, 2010).

PROPIEDAD	PLACA Y MARCO	TUBULAR	EN ESPIRAL	FIBRA FINA HUECA
Densidad de empaquetado $\text{pie}^2/\text{pie}^3$	45-150	6-120	150-180	150-1500
Potencial de incrustación	Moderado	Bajo	Alto	Muy alto
Facilidad de limpiado	Buena	Excelente	Pobre	Pobre
Costo relativo de fabricación	Alto	Alto	Moderado	Bajo

Fuente: elaborado por las autoras

i) Placa y Marco

Los módulos RO de placa y marco son típicamente usados para aplicaciones especiales con altos contenidos de sólidos suspendidos y no se encuentran generalmente en instalaciones de purificación de agua.

Las características principales de los módulos de placa y marco son:

- ☐ Costosos por unidad de área de membrana
- ☐ Fáciles de limpiar
- ☐ Tienden a obstruirse
- ☐ Baja densidad de empaquetado

ii) Tubular

Los módulos RO tubulares son también usados para aplicaciones especiales con altos contenidos de sólidos típicamente encontrados en las industrias de procesamiento biológico y de comidas.

Las características principales de los módulos tubulares son:

- ☐ Relativamente costosos por unidad de área de membrana
- ☐ Fáciles de limpiar
- ☐ En la mayoría de las aplicaciones requieren limpieza diaria
- ☐ Requieren flujo alto por tubo para lograr alta velocidad de flujo cruzado y minimizar la obstrucción
- ☐ Usado especialmente en MF (microfiltración) y UF (ultrafiltración)

iii) En Espiral

Los módulos en espiral son los más comunes hoy en día en RO.

Las características principales de los módulos tubulares son:

- ☐ Densidad más bien alta
- ☐ Temperatura limitada a 45°C
- ☐ Moderadamente costosos pero con bajo costo por unidad de área de membrana
- ☐ Pueden ser difíciles de limpiar
- ☐ Alta área de membrana por unidad de volumen
- ☐ Módulos de alta calidad

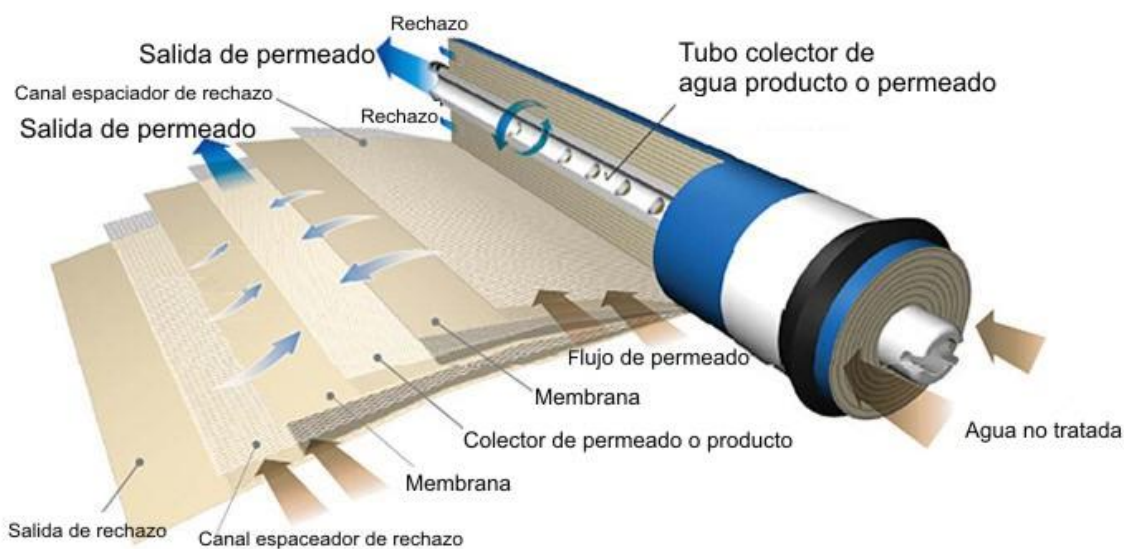


Figura 7. Construcción de una Membrana en espiral (<https://www.osmosisinversafiltroagua.com/tipos-de-membranas>)

iv) Fibra Fina Hueca

Los módulos RO de fibra fina hueca son membranas formadas por tubos de diámetro muy pequeño, con diámetros externos de 85 micrones e internos de cerca de 42 micrones. Las fibras se parecen al cabello humano y pueden ser tan flexibles. La “piel” de la membrana o película delgada esta por fuera de la fibra. Esta piel es de cerca de 0,1 a 1 micra de espesor.

Las características de los módulos de fibra fina hueca son:

- ☐ Relativamente baratas
- ☐ Relativamente difíciles de limpiar
- ☐ Requieren agua de “alta calidad”
- ☐ Densidad de empaquetado extremadamente alta

Los módulos de fibra hueca ofrecen mayor área de membrana por módulo que los módulos en espiral. Esto permite una alta producción de agua del módulo y un menor espacio ocupado por los bancos de módulos en la planta debido a su alta compacidad.

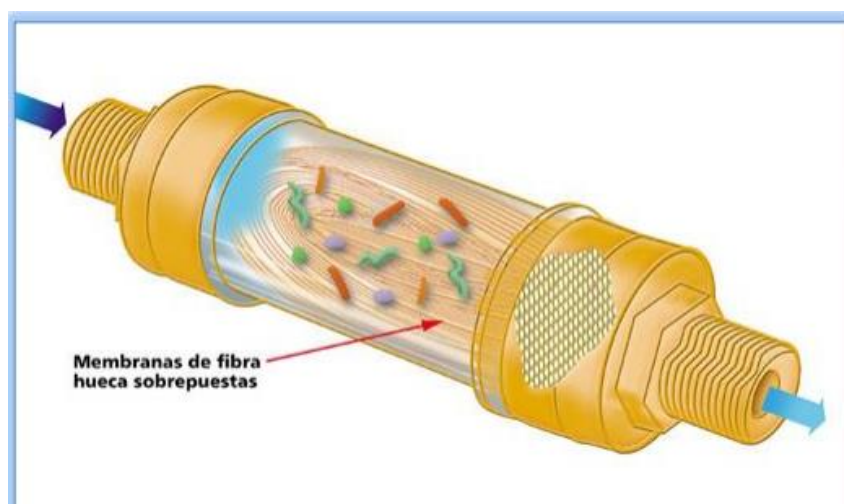


Figura 8. Filtro con membrana de fibra fina hueca
(<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/20398/fichero/Anexos.pdf>)

1.2.3.3 Clasificación de las membranas según rendimiento

Los tres parámetros más importantes para evaluar el rendimiento de una membrana de RO son: rechazo de sales, flujo/productividad y presión de operación. Las membranas compuestas de película delgada disponibles comercialmente pueden ser clasificadas, según uno a más de estos parámetros, en los siguientes grupos (VEOLIA WATER, 2017):

- ☐ Membranas de rechazo estándar
- ☐ Membranas de alto rechazo
- ☐ Membranas de alta productividad (o baja energía)
- ☐ Membranas de alta presión

A. Membranas de rechazo estándar

Las membranas de rechazo estándar están diseñadas para remover el 99,6% de las sales de la fuente de abastecimiento.

B. Membranas de alto rechazo

Las membranas de alto rechazo están diseñadas con estructuras más ajustadas permitiendo incrementar la masa de rechazo de iones y rechazar iones de menor tamaño, tales como el boro, por ejemplo. Su capacidad de rechazo es del 99,75-99,85% al precio de un 10-20% más de presión de operación.

C. Membranas de alta productividad (baja energía)

Las membranas de alta productividad son diseñadas con características para producir más agua producida por elemento de membrana. Estas características son: (1) mayor superficie y (2) empaquetado más denso. El aumento del área activa de superficie de membrana permite un aumento significativo de la productividad usando el mismo tamaño

(diámetro) del elemento de membrana.

D. Membranas de alta presión

El objetivo de este tipo de membranas es producir agua fresca de agua de mar concentrada con salinidad de 50.000-60.000 mg/L y son usadas para maximizar el agua recuperada a partir de un volumen de agua de abastecimiento dado. Mientras una membrana estándar permite solo recuperar hasta un 50% del agua de abastecimiento, las membranas de alta presión son adecuadas para obtener recuperaciones del 60% y superiores.

1.2.3.4 Membranas comercialmente disponibles

Muchas variedades de membranas compuestas de poliamida de espiral enrollados son aptas para diferentes condiciones de agua de alimentación. Las membranas discutidas aquí incluyen:

- Membranas de agua de mar.
- Membranas de agua salobre.
- Membranas salobres de baja energía.
- Membranas salobres de baja presión diferencial.
- Membranas salobres de bajo ensuciamiento.

a) Membranas de agua de mar

Las membranas de agua de mar se usan para tratar alta salinidad (35,000 a 50,000 ppm de sólidos totales disueltos (TDS)) en aguas de alimentación. Estas membranas pueden operar a presiones arriba de 1 500 psi. Las condiciones de ensayo de estas membranas comunes son como sigue:

- a) Concentración de agua de alimentación: 32 000 ppm de NaCl (cloruro de sodio).
- b) Presión de operación: 800 psi
- c) Temperatura: 77°F
- d) pH de agua de alimentación: 6,5 – 8,0
- e) Recuperación por módulo: 8% – 10%.

Dentro de la clasificación de las membranas de agua de mar, existen subconjuntos de membranas que son tasadas para diferente rendimiento. Por ejemplo, los sistemas de membranas Koch ofrecen un estándar de alto rechazo de los módulos de membrana de agua de mar más un alto flujo del módulo del elemento de membrana de agua de mar. En la Tabla N° 11 lista la productividad y el rechazo para dos tipos de membrana de agua de mar. Otros suministradores de membranas ofrecen variedad similar en membranas de agua de mar.

Tabla 6

Comparación de sistemas de membranas Koch – Membranas de agua de mar (Wagner, 2001).

Sistemas de Membranas Koch Membranas de agua de mar	Flujo de permeado* (gpd)	Rechazo* (%)
8040-HF-400	9500	99.7
8040-SW-400	7200	99.75

*Para módulo de membrana de 400 pie²

b) Membranas de Agua Salobre

Las membranas de agua salobre se diseñan para tratar aguas de alimentación de baja salinidad, hasta cerca de 4 000 a 5 000 ppm (TDS). La presión de operación máxima para membranas de agua salobre es comúnmente 600 psi. Estas membranas son comúnmente ensayadas a las siguientes condiciones:

- a) Concentración del agua de alimentación: 1 500 a 2 000 ppm de NaCl (membranas de baja energía se ensayan a 500 – 2 000 ppm de NaCl)
- b) Presión de operación: 225 psi (membranas de baja energía se ensayan a 100 – 150 psi).
- c) Temperatura: 77°F
- d) pH del agua de alimentación: 6,5 – 7,0.
- e) Recuperación por módulo: 15%

Como con las membranas de agua de mar, no hay una condición de ensayo uniforme para todas las membranas de agua salobre del mismo tipo. Así, una comparación directa entre fabricantes requiere un vistazo de cerca a condiciones de ensayo.

c) Membranas de agua salobre de baja energía

Las membranas de baja energía se diseñan para reducir la energía requerida para generar permeado. En la mayoría de los casos, las membranas muestran similar productividad, pero a bajas presiones de operación que las membranas estándar de Osmosis Inversa. Bajas presiones de operación es una ventaja cuando los costos de energía son altos o cuando la temperatura del agua de alimentación es baja (bajas temperaturas de agua reducen el agua a través de la membrana si la presión se mantiene constante). Una limitante de las membranas de baja presión es que el rechazo es más bajo que las membranas de agua salobre estándar. En algunos casos el rechazo cae lo suficiente hacia el doble de pasaje de sales comparado con el estándar de las membranas de agua salobre.

d) Membranas de aguas salobres de alto rechazo

Las membranas de agua salobre de alto rechazo varían en la décima parte de un porcentaje alto de rechazo que las membranas de agua salobre estándar. Mientras el rechazo estándar esta comúnmente cerca del 99,0% a 99,5%, las membranas de alto rechazo pueden ir tan altas como 99,7% de rechazo (algunas membranas recientes ahora pretenden un rechazo de 99,75%). Avanzando de un rechazo de 99,5% (0,5% de pasaje de sales) a 99,7% de rechazo (0,3% de pasaje de sales) disminuye el pasaje de sales en un 67%. Esto puede ser crítico en aplicaciones de alta pureza.

e) Membranas de agua salobre de bajo ensuciamiento

La membrana de agua salobre estándar tiene una carga negativa mientras la membrana de bajo ensuciamiento tiene carga superficial neutra. Esto minimizara el ensuciamiento con polímeros catiónicos y surfactantes como también otras especies cargadas positivamente que ensuciaran las membranas cargadas negativamente. Adicionalmente, los módulos de membranas se construyen usando 31 mil espaciadores de alimentación más que 28 mil de espaciador. Los espaciadores de alimentación más gruesos son más tolerables para el ensuciamiento con sólidos suspendidos que los espaciadores delgados

- **Módulos de membranas de baja presión diferencial**

Módulos de membrana de baja presión diferencial puede considerarse como subconjunto de membranas de bajo ensuciamiento. Los módulos de membrana de baja presión diferencial comúnmente tienen un espaciador de

alimentación grueso. En lugar de un espaciador grueso estándar de 28 mil, estas membranas de baja presión diferencial tienen espaciadores gruesos de 31 mil o 34 mil. Hay menos resistencia al flujo a través de los canales de alimentación, resultando en bajas caídas de presión a través de los módulos de membranas. Además, los canales de alimentación no se obstruirán tan rápidamente con los sólidos suspendidos, sustancias que ensucian, o incrustación.

- **Módulos de membrana de alta productividad**

Los módulos de membrana de alta productividad contienen más área de membrana que las membranas de agua salobre estándar a pesar de ser adecuados dentro del mismo tamaño de módulo de la membrana. Se logra una mayor área de membrana usando técnicas de montaje de módulos más sofisticada.

Se debe cuidar el posicionamiento de las líneas de pegamento sobre las hojas de membrana y montajes de módulo automatizado son dos mejoras en el montaje de módulos que ha permitido la inclusión de más área de membrana. Mientras una membrana estándar de agua salobre comúnmente tiene cerca de 365 pies cuadrados de área de membrana, los módulos de alta productividad de membrana podrían tener 400 pies cuadrados hasta un área de membrana de 440 pies cuadrados de área de membrana.

La productividad de un módulo de membrana es alta debido al

área de membrana adicional. En general, un módulo de membrana de 400 pies cuadrados produce cerca de 10% más permeado que un módulo de membrana de 365 pies cuadrados bajo condiciones de operación similares.

1.2.4 PARÁMETROS DE OPERACIÓN EN LA OSMOSIS INVERSA

La Figura 9 muestra un elemento de una membrana, así como los parámetros básicos para describir el flujo, concentración y presión.

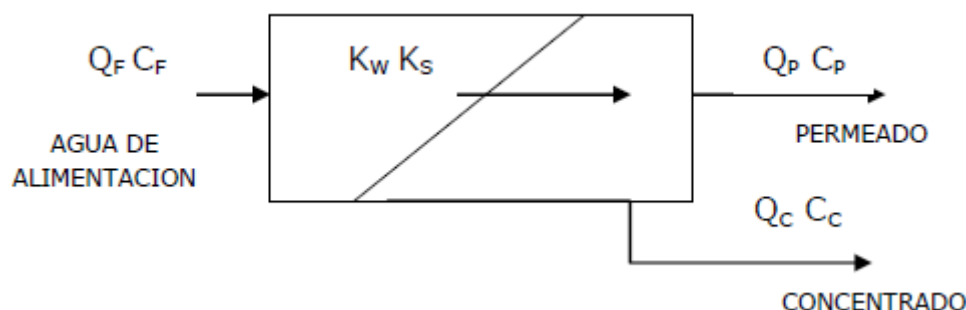


Figura 9. Parámetros a considerar en el diseño de una membrana de ósmosis inversa (Elaboración propia).

Se aplican las siguientes definiciones y ecuaciones:

Q_F = Tasa de flujo de agua de alimentación en unidades de volumen por tiempo, v. gr. gpd (galones por día).

Q_P = Tasa de flujo de permeado en unidades de volumen por tiempo, v. gr. gpd

Q_C = Tasa de flujo de concentrado en unidades de volumen por tiempo, v. gr. gpd

C_F = Concentración de soluto en el agua de agua de alimentación en unidades de masa, v. gr. mg/L

C_P = Concentración de soluto en permeado en unidades de masa, v. gr. mg/L

C_C = Concentración de soluto concentrado en unidades de masa, v. gr. mg/L

K_W = Coeficiente de transferencia de masa de agua en unidades de flujo de agua

por presión, v. gr. gpd/ft²/psi

K_s = Coeficiente de transferencia de masa de soluto en unidades de longitud por tiempo, v. gr. ft/d

1.2.4.1 Balance de masa para el flujo de agua

$$Q_F = Q_P + Q_C$$

1.2.4.2 Balance de masa para el flujo de soluto

$$Q_F C_F = Q_P C_P + Q_C C_C$$

1.2.4.3 Flujo de Membrana (Flux)

Tasa de flujo de permeado por unidad de área de membrana. Se expresa en metros cúbicos por metro cuadrado (m³/s m²) o galones por día por pie cuadrado (gfd) del área de superficie de la membrana activa.

$$J = K (\Delta P - \Delta \Pi)$$

Donde:

J Flujo de agua

K : Coeficiente de transporte de agua = permeabilidad / espesor de capa activa de membrana.

Δ P: Diferencia de presión a través de membrana.

Δ Π: Diferencia de presión osmótica a través de la membrana.

Nota que el coeficiente de transporte de agua es único para una membrana dada y no es contante, este varía directamente con la temperatura. El coeficiente para algunas membranas de poliamida reciente varia con el pH. El diseñador de la Osmosis Inversa elije la razón de flux; esta no es una característica de la membrana. En general el flux que se ha diseñado para un sistema RO; debería ser una función

de la calidad de agua afluente. La Tabla 7 muestra el flujo recomendado como función de la calidad del agua afluente y el índice de densidad de lodos (SDI), el cual es una medida de la tendencia de ensuciamiento de la membrana.

Tabla 7

Flujo recomendado como función de la fuente de agua efluente (Wagner, 2001)

Fuente de agua alimentada	SDI	Flujo recomendado, gfd*
Permeado de RO	< 1	21 – 25
Agua de pozo	< 3	14 – 16
Agua superficial	< 3	12 – 14
Agua superficial	< 5	10 – 12
Efluente Municipal secundario – Microfiltración como pretratamiento**	< 3	10 – 14
Efluente Municipal secundario – Pretratamiento convencional	< 5	8 - 12

*Para módulo de membranas de 8 pulgadas de diámetro

** Tamaño de poro de microfiltración < 0,5 micrones

Fuente: elaborada por las autoras

1.2.4.4 Recuperación (R)

La razón entre el volumen de agua producido por el sistema de membrana (QP) y el volumen de agua de suministro (QF) para esta producción es comúnmente definido como recuperación y se expresa como un porcentaje del volumen de agua de abastecimiento.

$$R = \frac{Q_P}{Q_F} \times 100$$

Generalmente los sistemas de osmosis inversa recuperan en el rango de 50% a 85%, con la mayoría de sistemas diseñados para recuperación de 75%. Las recuperaciones de los módulos de membranas de espiral enrollado individual varían de 10% a 15% adicional. Un sistema de recuperación de 75% significa que para cada

100 gpm de afluente, 75 gpm llegarán a ser permeado y 25 gpm serán retenidas como concentrado.

La recuperación de un sistema de Osmosis Inversa es fijada por el diseñador. Cuando se excede el valor de recuperación de diseño puede ocasionar un ensuciamiento e incrustación acelerada de las membranas, debido a que hay menos agua disponible para limpiar las membranas o el lado de concentrado. Caer debajo de la recuperación de diseño ni impactara adversamente en el ensuciamiento o incrustación de las membranas, pero resultara en altos volúmenes de agua residual del sistema de Osmosis Inversa.

1.2.4.5 Factor de Concentración (CF)

Razón de la concentración de solutos en el flujo de concentrado (C_C) a la concentración de solutos en el flujo de alimentación (C_F).

$$CF = \frac{C_C}{C_F}$$

Si se asume una concentración muy baja en el permeado, entonces el CF puede aproximarse por:

$$CF = \frac{Q_F}{Q_C} = \frac{1}{1 - R}$$

Donde R = Recuperación expresado como un decimal

Para un cálculo más preciso, si conocemos el paso de sales (o el rechazo de sales), el factor de concentración puede ser calculado como:

$$CF = \frac{[1 - (R \times SP)]}{1 - R}$$

Donde R y SP se expresan como decimales.

La calidad del concentrado también puede ser predicha con base en un

modelo de difusión si se conoce la presión de operación, la calidad del agua de abastecimiento, el porcentaje de recuperación y el coeficiente de transferencia de masa de soluto.

Al 75% de recuperación, el volumen de concentrado es un cuarto del volumen de afluente. Si se asume que la membrana retiene todos los sólidos disueltos, estos serán contenidos en un cuarto del volumen de agua afluente. De aquí, la concentración de sólidos disueltos retenidos será aproximadamente cuatro veces que la corriente afluente. En la Tabla 8 se presenta el factor de concentración en función del porcentaje de recuperación.

Tabla 8

Factor de concentración como función del porcentaje de recuperación (Wagner, 2001).

RECUPERACIÓN (%)	FACTOR CONCENTRACIÓN
50	2
66	3
75	4
80	5
83	6
87,5	8

Fuente: elaborado por las autoras

1.2.4.6 Paso de Sales (SP)

Se refiere al porcentaje de sales disueltas del agua fuente (C_F) que pasan a través de la membrana al agua producida (C_P)

$$SP = \frac{C_P}{C_F} \times 100\%$$

1.2.4.7 Rechazo de sales (SR)

La concentración de sales en el agua de abastecimiento (C_F) que es rechazada por una membrana. Se calcula como:

$$SR = \left(\frac{C_F - C_P}{C_F} \right) \times 100\% = 100\% - SP$$

Cada membrana tiene la habilidad de rechazar un cierto porcentaje de las sales presentes en el agua de alimentación. La mayoría de las membranas RO pueden rechazar del 95 al 99,5% de las sales de agua de abastecimiento.

1.2.4.8 Polarización de concentración

Mientras el agua permea a través de la membrana, la materia rechazada se acumula detrás de la membrana y forma una capa de alta concentración de sales que incrementa la presión osmótica y reduce la permeabilidad. El fenómeno de formación de esta capa cercana a la membrana y con mayor concentración relativa de sales respecto de la solución de alimentación se llama polarización de concentración. La razón de la concentración de sal cercana a la pared de membrana sobre la concentración en el flujo general se conoce como factor beta (López, 2015).

La polarización de concentración tiene un efecto negativo sobre el rendimiento de una membrana de Osmosis Inversa. Esta actúa reduciendo el rendimiento de una membrana en tres formas importantes. Primero, actúa como resistencia hidráulica al flujo de agua a través de la membrana. Segundo, la acumulación de solutos incrementa la presión osmótica dentro de la capa límite, reduciendo efectivamente la fuerza impulsora para el agua a través de la membrana. Tercero, hay más alta concentración de solutos sobre la superficie de la membrana que en la masa de solución, lo cual conduce a un mayor pasaje de solutos que serán predichos por la concentración de agua de alimentación. Esto debido a que las membranas de

Osmosis Inversa rechazan solutos basado en la concentración que esta “ve”.

Si la concentración de una especie es alta en la superficie de la membrana, como es el caso con la polarización de concentración, la cantidad de soluto que pasa en el permeado será más alto que la cantidad esperada de soluto basada en la concentración de la masa de ese soluto. El rechazo actual y el pasaje de sales mostrado por la membrana no cambian.

Sin embargo, el rechazo/pasaje aparente sí. Por ejemplo, asume que la concentración de masa de sílice es 10 ppm., mientras que la concentración en la superficie de la membrana es 11,5 ppm. Si el rechazo es 98%, la concentración de sílice esperada en el permeado sobre la concentración de masa es 0,20 ppm. Sin embargo, la membrana “ve” 11,5 ppm, así el pasaje actual de sales es 2% de 11,5 ppm, o 0,23 ppm. El rechazo actual es todavía 98%. El rechazo aparente es 97,7%.

Beta, algunas veces llamada “factor de polarización de concentración”, es el ratio de la concentración de especies en la superficie de membrana en la masa de solución. Por lo tanto, Beta es una manera de cuantificación de la polarización de concentración.

Mientras más alto es el número Beta, más probable que las membranas se ensucien e incrusten. Nuevamente, debido a que Beta mide el ratio de concentración en la superficie hacia la masa de la solución, a más alto número Beta, más alta la concentración relativa en la superficie. Si la concentración en la superficie llega a ser suficientemente alta, podría alcanzarse la saturación

ye empezara a formarse incrustación. El máximo valor Beta comúnmente aceptado varia en el rango de 1,0 – 1,2 para minimizar la formación de incrustación.

1.2.5 DESEMPEÑO DE LA OSMOSIS INVERSA

La unidad de ósmosis inversa (RO) es capaz de eliminar cantidades sustanciales de la mayoría de productos químicos inorgánicos (tales como sales, metales, minerales), la mayoría de microorganismos, incluidas las *cryptosporidium* y *giardia*, y la mayoría (pero no todos) contaminantes inorgánicos.

La ósmosis inversa trata con éxito el agua con minerales disueltos y metales como el aluminio, arsénico, bario, cadmio, cloruro, cromo, cobre, flúor, magnesio, hierro, plomo, manganeso, mercurio, nitrato, selenio, plata, sulfato y zinc. 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. Cuando se utiliza un pre-filtrado de carbón activado (algo común en la mayoría de sistemas RO), también se puede proporcionar tratamiento adicional para contaminantes orgánicos volátiles (COV) como el benceno, MTBE, tricloroetileno, trihalometanos, y el radón.

En esencia, la ósmosis inversa es capaz de rechazar las bacterias, sales, azúcares, proteínas, partículas, colorantes, metales pesados, cloro y subproductos relacionados, y otros contaminantes que tienen un peso molecular superior a 150-250 daltons. La separación de iones con ósmosis inversa es ayudada por las partículas cargadas. Esto significa que los iones disueltos que llevan una carga, tales 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 probablemente será rechazada.

Una lista más completa se puede observar en la Tabla 9.

Tabla 9

Índices de rechazo típicos de una membrana de osmosis inversa

ÍNDICES DE RECHAZO DE LA OSMOSIS INVERSA			
Aluminio	97-98%	Fosfato	99+ %
Amonio	85-95%	Polifosfato	98-99%
Arsénico	94-96%	Hierro	98-99%
Bacterias	99+ %	Plomo	96-98%
Bicarbonato	95-96%	Magnesio	96-98%
Bromuro	93-96%	Potasio	92%
Cadmio	96-98%	Pirógenos	99+ %
Calcio	96-98%	Radioactividad	95-98%
Cloro	94-95%	Radio	97%
Cromato	90-98%	Selenio	97%
Cromo	96-98%	Silicona	85-90%
Cobre	97-99%	Silicato	95-97%
Cianuro	90-95%	Plata	95-97%
Ferrocianuro	98-99%	Sodio	92-98%
Fluoruro	94-96%	Sulfuros	99+ %
Hierro	98-99%	Sulfato	96-98%
Plomo	96-98%	Zinc	98-99%
Magnesio	96-98%	* Virus	99+ %
Manganeso	96-98%	* Insecticidas	97%
Mercurio	96-98%	* Detergentes	97%
Níquel	97-99%	* Herbicidas	97%
Nitrato	93-96%	% TDS	95-99%

(Tejedor, 2008).

*Estimaciones conservadoras

Fuente: elaborada por el autor

La carga iónica del componente de interés juega un papel importante en su rechazo por una membrana de Osmosis Inversa; el rechazo de iones multivalentes es generalmente mayor que los iones monovalentes.

En adición, a la carga iónica, el rechazo de una especie particular también se basa en las siguientes características:

- a) Grado de disociación. - En general, a mayor disociación mayor rechazo, por ejemplo, los ácidos débiles se rechazan mejor a alto pH.

- b) Peso molecular. - En general, a mayor peso molecular, mayor rechazo, por ejemplo, el rechazo del calcio es marginalmente mejor que el rechazo de magnesio.
- c) Polaridad. - En general, a mayor polaridad, más bajo rechazo, por ejemplo, los compuestos orgánicos son mejor rechazados que el agua.
- d) Grado de hidratación. - En general a mayor grado de hidratación, mayor rechazo, por ejemplo, el cloruro se rechaza mejor que el
- e) Grado de ramificación molecular. - En general, a más ramificación, mayor rechazo, por ejemplo, el isopropanol es mejor rechazado que el n – propanol.

El rechazo de los gases es 0%, significa que la concentración en la corriente de permeado será la misma que en las corrientes de afluente y concentrado. Los gases no se rechazan incluido el cloro libre que se usa en la desinfección de agua de alimentación de la Osmosis Inversa a través del sistema de pre-tratamiento y dióxido de carbono. Díaz (2018), declaro medida de seguridad para el Sistema de abastecimiento de agua de pozo, para consumo humano del Centro Poblado Cruz del Medano, entre otros del distrito de Morrope. (Tabla 10).

Resultados de Análisis Fisicoquímicos de las muestras de agua de Pozo: MORROPE.
Informe con Valor Oficial MA1615437 de SGS DEL PERU SAC DIVISION LABORATORIO.

Tabla 10.

Análisis Fisicoquímicos de las muestras de agua de Pozo: MORROPE.

<i>Parámetro analizado</i>	<i>Muestra Pozo Cruz del Médano</i>	<i>Límite Máximo Permisible D.S. N° 031-2010-SA</i>	<i>Estándares de Calidad Ambiental para Agua D .S. N° 0015-2015-MINAM</i>
Cianuro Total (mg/L)	0.010	0.070	0.07
Color Verdadero (UC)	< 0.6	15	15
Conductividad (uS/cm)	1008.00	1500	1500
Dureza Total (mgCaCO ₃)/L	121.4	500	500
(pH)	8.05	6.5 a 8.5	6.5 – 8.5
Sólidos Totales Disueltos (mg/L)	573	1000	1000
Turbidez (NTU)	0.5	5	5
Cloruro (mg/L)	98.994	250	250
Fluoruro (mg/L)	0.643	1.5	
Nitrato (mg/L)	0.011	50.00	50
Nitrito (mg/L)	< 0.001	3.0 (exposition corta)	3
Sulfato (mg/L)	77.88	250	250
Aluminio Total (mg/L)	< 0.001	0.2	0.9
Antimonio Total (mg/L)	< 0.0001	0.020	0.02
Arsenico total (mg/L)	0.0714	0.010	0.01
Bario Total (mg/L)	0.0068	0.700	0.7
Berilio Total (mg/L)	< 0.00004	0.012	
Bismuto Total (mg/L)	< 0.00001		
Silice total (mg/L)	13.74		

Fuente: elaborada por el autor.

1.2.5.1 Costo de Producción

El costo de desalinizar con tecnología RO ha disminuido drásticamente en los últimos 20 años hasta un valor inferior a USD 0,50/m³. Una de las razones para esta disminución es la reducción de los costos unitarios de las membranas combinada con el incremento de la productividad (flujo) y rechazo. Otro factor significativo de la reducción de costo es la disminución en el costo de la energía gracias a desarrollo de nuevos dispositivos de recuperación de energía. Adicionalmente, las mejoras en las tecnologías de pretratamiento y un mejor entendimiento de la parte operativa han permitido incrementar la vida útil de las

membranas y por tanto reducir los costos asociados a la limpieza y reemplazo de las mismas.

La Tabla 11 resume los costos de producción de agua en una planta desalinizadora de agua de mar de 200.000 m³/día con tecnología RO.

Tabla 11

Costo de producción de agua en una planta desalinizadora de agua de mar de 200000 m³/día con tecnología de Osmosis Inversa (Devora et al., 2016)

Componentes del costo de producción	USD/m ³
Costo de capital, incluyendo terreno (25 años @ 6,0% de interés)	0,203-0,338
Electricidad (USD 0,60/kWh)	0,180-0,240
Reemplazo de membranas RO (5 años de vida útil)	0,025-0,035
Remplazo de membranas MF (7 años de vida útil)	0,019-0,030
Químicos	0,020-0,025
Mantenimiento y repuestos	0,023-0,038
Mano de obra	0,030-0,044
Costo Total	0,50-0,75

Fuente: elaboración propia

Es importante notar que el costo total de producción depende no solo de estado actual de la tecnología sino de que tan bien este estructurado la implementación y financiación del proyecto

1.2.5.2 Consumo de Energía

Actualmente la energía usada por un sistema RO es de 2.2-2.7 kWh/m³ de agua dulce producida sobre la base de un 50% de recuperación.

1.2.5.3 Ventajas y Desventajas de la Osmosis Inversa

Ventajas:

- Una muy alta tasa de rechazo para una amplia gama de contaminantes
- Muy rentable en el largo plazo; bajo costo por como 5 centavos de dólar por galón de agua pura.

Desventajas:

- requiere de pre-filtración de sedimentos y de carbono pre-filtración (generalmente incluido como parte del sistema) para evitar que la membrana se obstruya.
- Como la ósmosis inversa trabaja en contra de la presión osmótica estándar, el proceso es bastante lento en general. Además, se produce agua de desperdicio.

1.2.5.4 Mantenimiento de las Membranas de Osmosis Inversa

El desempeño de la membrana tiende a deteriorarse con el tiempo debido a una combinación de desgaste del material y a la obstrucción irreversible de los elementos de la membrana. Típicamente los elementos de la membrana deben ser reemplazados cada 5-7 años para mantener su desempeño en términos de calidad del agua y consumo de potencia para la separación de sales.

1.2.5.5 Limpieza de membranas de Osmosis Inversa

La limpieza de las membranas es uno de los más importantes aspectos de las operaciones de membranas. A pesar de cuan bueno sea el pre – tratamiento y el diseño del sistema de Osmosis Inversa, las membranas eventualmente se ensuciarán y/o incrustaran. La limpieza oportuna y efectiva es necesaria para mantener las

membranas libres de sustancias ensuciantes e incrustación, las cuales se pueden traducir en largos intervalos de limpieza, y larga vida de las membranas, ambas ahorran dinero, tiempo, y ambiente.

Las membranas deberían limpiarse cuando el flujo de permeado normalizado cae un 10% – 15% del rendimiento estabilizado inicial, o cuando el diferencial de presión se incremente por un 10 – 15%. En la Figura 10. se muestra un sistema típico de limpieza de las membranas de osmosis inversa.

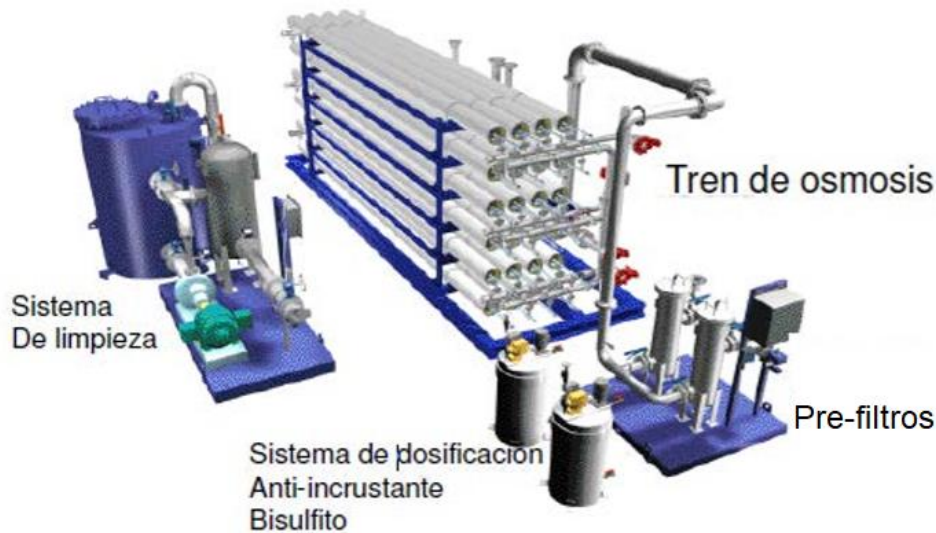


Figura 10. Elementos de un sistema de osmosis inversa (Gamma Quimica de Venezuela, C.A., y Down, 2016).

1.2.6 SILICE

La sílice se presenta en el agua en cuatro formas.

- Estado iónico, conocido como sílice reactiva, se presenta como ácidos metasilícico (H_4SiO_4) y ortosilícico (H_2SiO_3) como monómeros.
- Polímeros de los ácidos anteriores: forma de miscelas coloidales. Fácilmente hidrolizables a estado iónico. Se conoce como sílice coloidal.

- Adsorbida en materiales solidos: coprecipitada con óxidos de hierro, aluminio o materia orgánica. Es parte de la sílice no-reactiva.
- Fragmentos de arcillas y rocas: materiales estables con tamaños de partículas desde arenas muy finas a partículas coloidales. También forma parte de la sílice no-reactiva.

La solubilidad de la sílice en el agua depende de la temperatura, pH, naturaleza de la fase sólida y presión. El comportamiento y la solubilidad es influenciada por la presencia de otros elementos como: Hierro, Aluminio, Managaneso y materia orgánica. Ej: en presencia de Fe la solubilidad disminuye 50%. La incorporación de CO₂ y ácidos orgánicos (Actividad microbiana) produce la degradación ácida de los minerales de Fe, Al y los silicatos. La interacción de todos ellos produce coloides que son estabilizados o peptizados por el ácido húmico.

1.2.6.1 Medición de sílice

Para medir la sílice reactiva se utiliza el método colorimétrico, para lo cual se forma un complejo reducido de color azul de silico-molibdato lo cual no detecta formas polimerizadas del elemento sino solo sílice soluble. Se limita a concentraciones de 100 ppm.

Para medir sílice no reactiva, se realiza en forma indirecta. Se trata la muestra con HF para solubilizar toda la sílice y se determina el contenido total. Luego se subtrae de esta medición la sílice reactiva.

1.2.6.2 Problemas que causan la presencia de sílice en el agua

Cuando se concentra y precipita produce depósitos en calderas. Se deposita en superficies de intercambio de calor en sistemas de enfriamiento. Interfiere con la estabilidad de componentes de productos farmacéuticos y alimenticios. A altas temperaturas y presiones se volatiliza con el vapor y se deposita en álabes de turbinas. Obstruye membranas de ósmosis inversa y sistemas de electrodiálisis con grandes pérdidas de energía y eficiencia. Los depósitos son de naturaleza vítrea muy difícil de remover.

El nivel de sílice, expresado como SiO_2 en el agua de alimentación a calderas para evitar posibles problemas de incrustación en tubería y en alabes de turbina está en función de la presión de la caldera. En la Tabla 12 se presenta las tolerancias de sílice en agua de alimentación para calderas.

Tabla 12

*Tolerancias de sílice en aguas de alimentación para calderas de tipo tambor (Gamma Química de Venezuela, C.A. y Dow, 2009)**

Presión de la caldera (Psig)	Máxima $[\text{SiO}_2]$ ppm
600	1.7-2.5
800	0.8-1.0
1000	0.3-0.4
1500	0.1-0.15
2000	0.04-0.06
2500	0.02-0.04
3000	0.05-0.01

*Menos de 0,02 ppm SiO_2 en el vapor y menos de 5% en la purga.

1.2.6.3 Métodos de remoción de sílice presente en el agua

Según Kohan (2000), entre los métodos más comúnmente utilizados para remover sílice del agua que se alimenta a calderas de alta presión se tiene:

- Precipitación química: en este caso se adiciona previamente sales de hierro y magnesio en forma de sulfatos o cloruros y alcalinizantes como CaO para formar hidróxidos que adsorben selectivamente la sílice y la precipitan.
- Destilación: proceso muy eficiente, pero de muy alto costo por el gasto de energía. Se emplea cuando la única fuente de agua es agua de mar.
- Osmosis inversa: tiene una alta eficiencia de rechazo de sílice, variando entre 65 a 90%. Muy eficiente removiendo sílice no reactiva. Se debe tener cuidado en la limpieza de membranas debido a que estas se pueden incrustar u obstruirse.
- Ultrafiltración: muy eficiente removiendo sílice no-reactiva. Opera a menores presiones que la osmosis inversa y se puede limpiar con lavados que evitan la incrustación y obstrucción de cartuchos.
- Intercambio iónico: comprende dos etapas. La primera es el paso por resina catiónica donde se convierte a HSiO_3 . Luego la remoción de silicatos por una resina aniónica fuerte e intercambio por ion hidroxilo.

1.2.7 DESCRIPCION DEL PROCESO OSMOSIS INVERSA DE LA PLANTA AGROLMOS

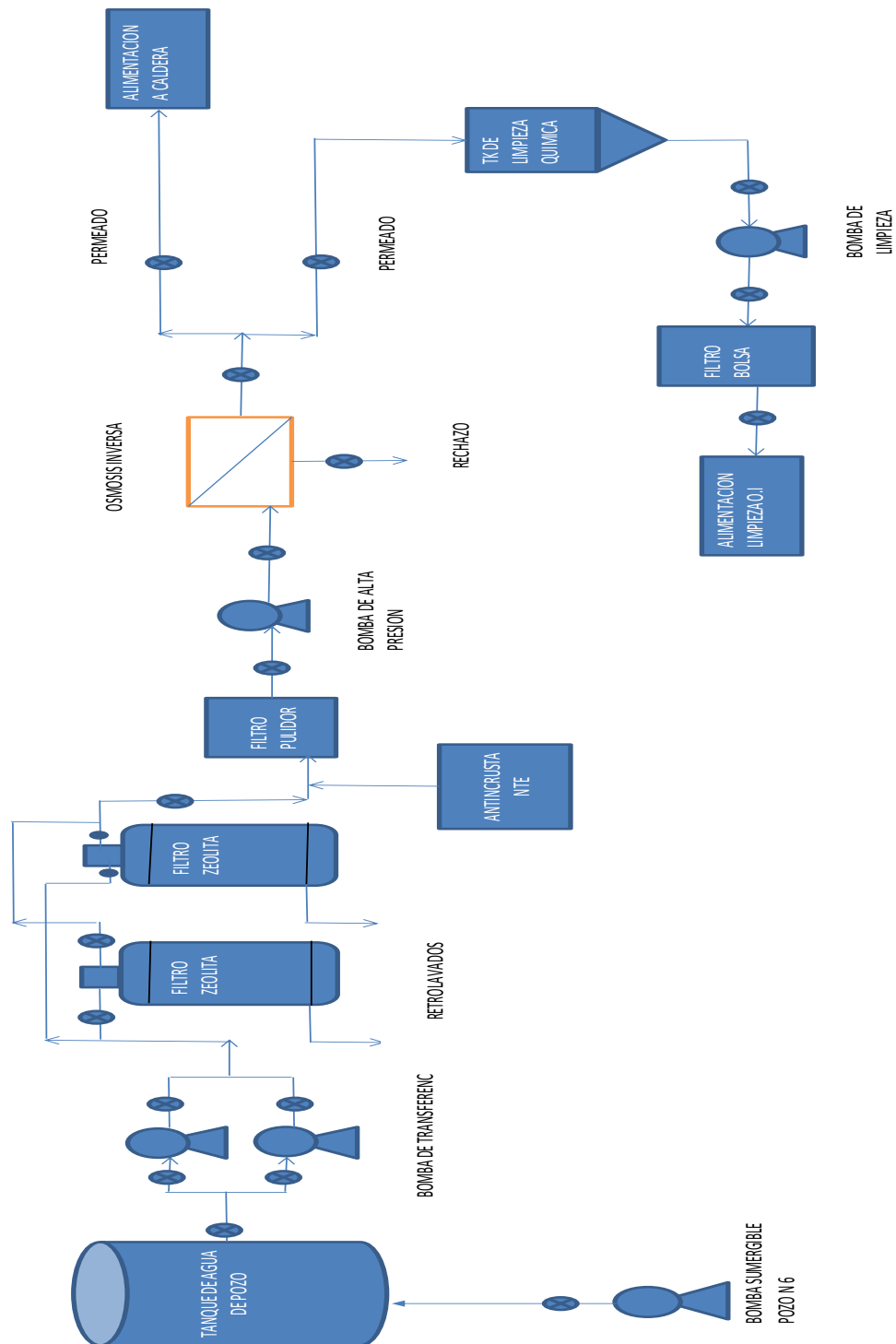


Figura 11. Diagrama de flujo del proceso de osmosis inversas en Planta Agrolmos (las autoras).

El proceso de obtención de agua de osmosis inversa, apta para alimentación de agua para la caldera se describe a continuación en base a la Figura 12. El proceso comprende:

- (1) Agua de alimentación: es el agua cruda proveniente del pozo #6 suministrada mediante una bomba sumergible.



Figura 12. Bomba sumergible (Planta Agrolmos)

- (2) El agua de pozo es bombeada y almacenada hacia un tanque de agua cruda cuya capacidad es de 1266 m³.



Figura 13. Tanque de almacenamiento de agua cruda (Planta Agrolmos)

- (3) El agua que fue almacenada en el tanque de agua cruda, con la ayuda de dos bombas de transferencia, pasa por una etapa de pre filtración a través de los filtros zeolita (previo al tratamiento químico), donde su función

principal es atrapar SDT (solidos totales disueltos; como arena), sedimentos inorgánicos, partículas mayores a 5 micras; etc.



Figura 14. Filtro zeolita (Planta Agrolmos)

(4) una vez ya pasada el agua por los filtros de zeolita, se aplica un tratamiento químico utilizando un anticrustante (este mismo que evita la incrustación en las membranas) y metabisulfito de sodio (neutraliza la acción del cloro, si el agua cruda trajera consigo) ya que este causaría rompimiento en las membranas.



Figura 15. Tratamiento químico (Planta Agrolmos)

(5) Ya pasado por el tratamiento químico, donde el grado de filtración obtenida en los filtros de zeolita no es suficiente para el ingreso de membranas, por lo que se somete a un segundo proceso de filtración a través de un grupo de filtros llamados filtros cartucho estos están constituidos en un depósito en cuyo interior se alojan. Cuya selectividad es de retención de 1 a 2 micras de partículas.



Figura 16. Filtros cartucho (Planta Agrolmos)

(6) Este es el paso a las etapas por las membranas desalinizadoras, donde las membranas de osmosis están estructurada y empaquetada cuidadosamente para su integración en las unidades del proceso , tanto el soporte de empaquetado tienen como objetivo maximizar el flujo de agua a través de la membrana, minimizando el paso de las sales incrustantes obtenidas en el agua cruda.



Figura 17. Membranas de O.I. (Planta Agrolmos)

- (7) La planta de osmosis inversa obtiene un rechazo como sub producto la cual es botada por una canaleta.



Figura 18. Agua de rechazo de la O.I. (Planta Agrolmos)

- (8) La planta de osmosis inversa obtiene un permeado como producto la cual es almacenada para su posterior uso como alimentación a la caldera.



Figura 19. Agua permeada de la O.I. (Planta Agrolmos)

- (9) Agua permeada almacenada proveniente de la planta de Osmosis Inversa capacidad 850 m³.

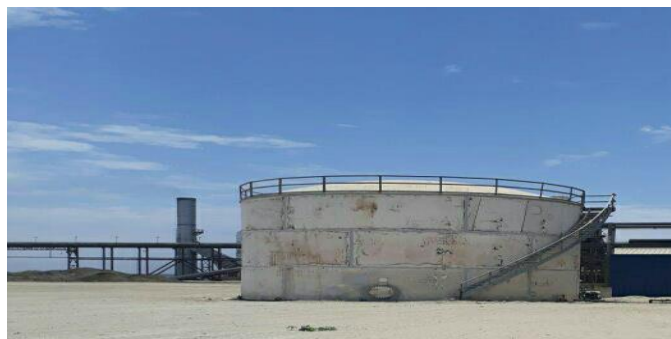


Figura 20. Almacenamiento de agua permeada (Planta Agrolmos)

1.2.8 TERMINOLOGIA EMPLEADA EN LA OPERACIÓN DE OSMOSIS INVERSA

Caudal de alimentación a la OI: Caudal necesario para obtener la cantidad de permeado especificada (Q_a).

Concentración de alimentación a la OI: Calidad del agua bruta de alimentación (C_a).

Presión de alimentación a la OI (P): Presión necesaria para impulsar el caudal de alimentación a través de las membranas de OI (P_a , entre 60 y 70 bar)

Caudal del perneado (Qp): Caudal de agua osmotizada que sale de la ósmosis para su posterior utilización. Es uno de los datos fundamentales para el diseño (entre el 43 y 58,5% del Q_a)

Concentración de permeado: Calidad del agua permeada o producida en la OI (C_p).

Presión del permeado: Presión a la que sale el permeado a la salida de la OI. No es relevante. (0.5 bar típico. Depende del circuito o recipiente receptor)

Caudal del rechazo: Caudal de salmuera que no atraviesa la membrana (entre el 55% y el 41,5% del Q_r).

Concentración de rechazo: Calidad del agua de rechazo en la OI (C_r).

Presión del rechazo: Presión a la que sale la salmuera de la OI (entre 1 y 3 bar menos que la P_a).

Tasa de recuperación o conversión: Relación en % entre el caudal de permeado y el de alimentación.

Factor de concentración: Número de veces que la salmuera se concentra respecto al agua de alimentación.

Rechazo de sal (RS): indica la capacidad para rechazar componentes inorgánicos disueltos. Generalmente aumenta con la presión de operación. Se calcula como: $\%RS = (1 - C_p/C_f) 100$. Donde C_p es la concentración de sales en el permeado y C_f es la concentración de sales en el agua de alimentación.

Rechazo iónico (RI): es la relaciona de conductividad entre la corriente de permeado o producto y la alimentación. $\%RI = \{(CO_A - CO_P) / CO_A\}100$. Donde CO_A es la conductividad en la alimentación y CO_P es la conductividad en el permeado.

Presión transmembrana: es la diferencia existente entre la presión en el conducto de alimentación y la presión en el conducto de filtrado.

Polarización por Concentración: Perfil de concentración que tiene un nivel mayor de soluto más cerca de la superficie exterior de la membrana, comparado con el fluido más alejado de la superficie de la membrana

Ensuciamiento: Proceso que provoca la pérdida de producción de una membrana, debido a la deposición de sustancias suspendidas o disueltas sobre su superficie externa, en las aberturas de los poros o dentro de los mismos

II. MATERIALES Y METODOS

2.1 POBLACION Y MUESTRA

UNIVERSO: el agua de alimentación al sistema de osmosis inversa de la Empresa Agroindustrial Agrolmos S.A.

POBLACION: 1266 m³ de agua almacenada en el tanque de alimentación al sistema de osmosis inversa de la Empresa Agroindustrial Agrolmos S.A., que paso por distintas etapas de pretratamientos

UNIDAD DE MUESTREO O ANALISIS: la muestra para los ensayos vario de 11.7 a 14.7 m³/h que corresponden a 20 minutos de proceso para los cuatro flujos de alimentación ensayados (35, 38, 41 y 44 m³/hr). Para los análisis del agua permeada se obtuvieron tres alícuotas espaciadas en un intervalo de tiempo de 5 minutos.

2.2 EQUIPOS Y MATERIALES DE LABORATORIO

EQUIPOS

- Planta de Osmosis Inversa
 - Modelo 80S60-6 1F-3F-5F-7F
 - Capacidad nominal: 25 m³/h
 - Cantidad de membranas: 30
 - Tipo de membrana: SW30HRLE-400, material TFC
 - Filtros cartuchos: 40 pulg de longitud, modelo CLR-1-30
 - Alimentación eléctrica: 440 V/3Ø/60Hz
 - Tipo de arranque: variador
 - Automatismo: PLC
 - Bomba de alta presion: 40 HP, centrifuga, modelo CR-32
 - Año de fabricación: agosto 2016

Fabricada por SICREA

- Conductivímetro: Marca Mettler Toledo, Modelo SevenEasy S30, rango de 0,01 $\mu\text{S/cm}$ hasta 500 $\mu\text{S/cm}$, resolución de 0,01 hasta 1.0, según el rango, precisión de $\pm 0,5\%$.
- pH-metro: Marca Mettler Toledo, Modelo Seven Easy S20, rango de 0,00 hasta 14.00, resolución 0,01, y precisión $\pm 0,01$. Temperatura de -5,0 hasta 105.0 $^{\circ}\text{C}$.
- Espectrofotómetro DR3900, VIS, Marca Hach, altura del haz 10 mm, ancho de banda espectral 5 nm ± 1 nm, exactitud de longitud de onda $\pm 1,5$ nm (rango 340 a 900 nm), exactitud fotométrica 1% en 0,50 a 2,0 Abs y 5 mAbs en 0,0 a 0,6 Abs, rango de longitud de onda 320 – 1100 nm, resolución de longitud de onda 1 nm.

MATERIALES

- Celdas de cuarzo para espectrofotómetro, de 10 mL.
- Diez frascos de plástico de 500 mL

REACTIVOS

- Kit de reactivos para sílice alto rango – marca HACH
 - Reactivo molibdato para sílice alto rango
 - Reactivo ácido para sílice alto rango
 - Ácido cítrico para sílice alto rango
- Kit de reactivos para sílice bajo rango – marca HACH
 - Reactivo molibdato 3 para sílice bajo rango
 - Ácido cítrico para sílice alto rango
 - Reactivo amino ácido F para sílice bajo rango
- Agua destilada

2.3 PROCEDIMIENTO

Inicialmente se pidió permiso y se realizó las coordinaciones con la Empresa Agroindustrial Agrolmos para que durante las pruebas se deje de bombear agua del pozo y solo utilizar el agua almacenada en el tanque de 1266 m^3 que dispone la empresa. Esto con la finalidad de uniformizar la calidad del agua alimentada al sistema de osmosis inversa durante todo el periodo de prueba.

Durante el tiempo de prueba se tomó cinco muestras en intervalos de una hora del agua pre tratada y que ingresa al sistema de ósmosis inversa. Se realizó un análisis fisicoquímico completo para tener referencia del agua de alimentación a las membranas.

Para cada variable ensayada se programó cuatro niveles. Flujos de entrada: $F1 = 35$, $F2 = 38$, $F3 = 41$ y $F4 = 44$ m³/hr respectivamente. Caídas de presión empleadas: $P1 = 40$, $P2 = 45$, $P3 = 50$ y $P4 = 55$ psi respectivamente. Se utilizó un diseño factorial de 4^2 , es decir 16 combinaciones, las cuales se repitieron tres veces, haciendo un total de 48 pruebas.

Las combinaciones basadas en el flujo (F) y la caída de presión (P) fueron:

F1 – P1	F2 – P1	F3 – P1	F4 – P1
F1 – P2	F2 – P2	F3 – P2	F4 – P2
F1 – P3	F2 – P3	F3 – P3	F4 – P3
F1 – P4	F2 – P4	F3 – P4	F4 – P4

Ajuste con el sistema de control centralizado, el cual cuenta con un sistema de registro en línea desde un controlador lógico programable (PLC). Para cada combinación se hizo el ajuste con el PLC, y se controló que no haya variación durante 20 minutos, durante las cuales se tomaba tres alícuotas de un litro cada 5 minutos para su posterior análisis. Para pasar del ajuste con una combinación a otra combinación se dejó pasar un tiempo de 10 minutos.

Después de cada ensayo que duró 20 minutos, con las tres alícuotas tomadas se hizo la mezcla y se envió a laboratorio para el respectivo análisis de conductividad y sílice.

La conductividad se midió utilizando el conductímetro SevenEasy S30, el cual cuenta con un compensador de temperatura.

El contenido de sílice en el permeado y en el rechazo se realizó utilizando la metodología HACH que consiste primero en tomar una muestra de 10 ml y colocarlo en una celda del espectrofotómetro. Se ajusta a una lectura en blanco que debe ser cero y luego se adiciona el reactivo para determinación de sílice,

de rango alto o rango bajo según se analice agua de rechazo o agua en el permeado respectivamente y se hizo la lectura directa en el espectrofotómetro.

Para determinar el porcentaje de recuperación en cada ensayo se anotó los valores registrados en línea en el PLC de volumen de agua suministrada (Q_F) y volumen de agua permeada (Q_P) y se halló la razón multiplicada por 100.

$$R = \frac{Q_P}{Q_F} * 100$$

Finalmente, con los resultados obtenidos se realizó un análisis factorial de la varianza de las variables ensayadas.

En la Figura 21 se resume el proceso realizado para obtención de los resultados:

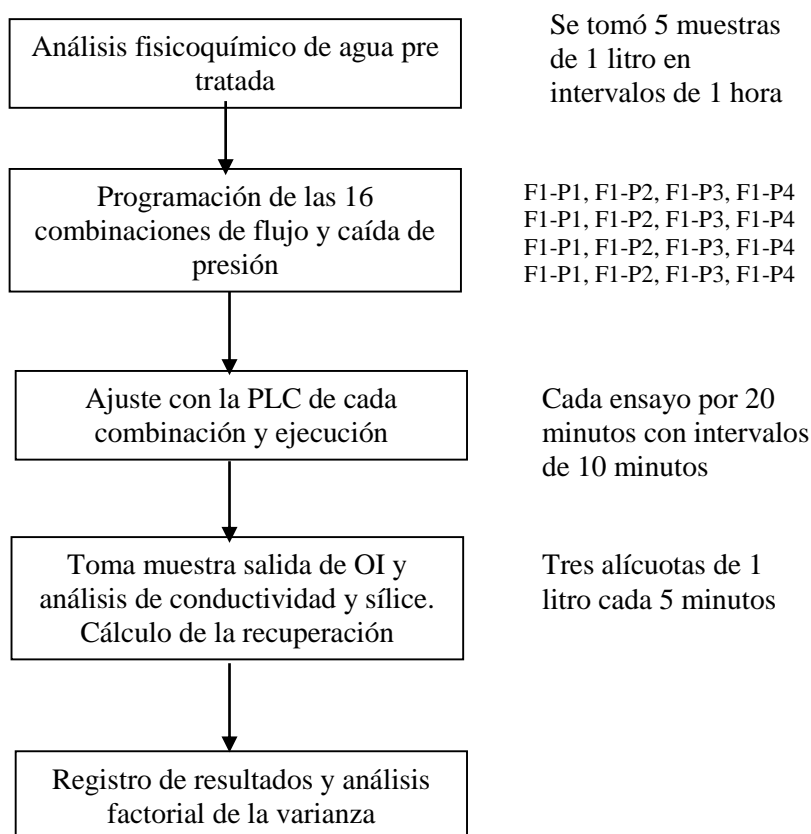


Figura 21. Diagrama de bloques del procedimiento para obtención de resultados (las autoras)

III. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos, así como el análisis factorial de la varianza de las dos variables ensayadas: flujo de alimentación al sistema de osmosis inversa y diferencia de presión durante la operación de la OI.

3.1 ANALISIS FISICOQUIMICO DEL AGUA DE ALIMENTACION A LA OI

En la Tabla 13 se resume los valores promedio de diferentes parámetros fisicoquímicos realizados al agua alimentada al sistema de osmosis inversa durante el periodo de prueba.

Tabla 13.

Análisis fisicoquímico del agua alimentada a las membranas de osmosis inversa de la Empresa Agroindustrial Olmos.

Parámetros	Unidad	Valor promedio
Ph	Und. pH	7.55
Conductividad	uS/cm	1315
Dureza total	mg/L CaCO ₃	174
Dureza cálcica	mg/L CaCO ₃	133
Dureza magnesiana	mg/L CaCO ₃	41
Alcalinidad – M	mg/L CaCO ₃	220
Cloruros	Mg/L Cl ⁻	200
Sulfato	mg/L SO ₄	80
Sílice	mg/L SiO ₂	45.2
Nitrato	mg/L NO ₃	2.7
Fosfato	mg/L PO ₄	0.22
Magnesio	mg/L Mg	14
Hierro total	mg/L Fe+3	< 0.04
Aluminio	mg/L Al+3	< 0.008
Turbiedad	NTU	0.01
Fluoruro	mg/L F	0.9
Bario	mg/L Ba	0.02
Estroncio	mg/L Sr	1.2
Aluminio	mg/L Al+3	0.01

Fuente: elaborado por las autoras

3.2 CONDUCTIVIDAD DE LOS PERMEADOS OBTENIDOS

En base a las 16 combinaciones de flujos de alimentación y caídas de presión durante la osmosis inversa, y realizando tres repeticiones de cada combinación, se obtuvo los resultados que se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14

Variación de la conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$) del permeado en función de la caída de presión y flujo de alimentación en base a agua de ingreso con $1315 \mu\text{S}/\text{cm}$

ΔP (psi) \ Flujo (m^3/hr)	40	45	50	55
35	10,33 11,10 10,25	9,54 9,12 10,02	8,17 8,56 8,82	7,99 7,21 7,91
38	11,94 12,37 12,02	10,77 10,21 10,90	9,20 9,42 9,71	8,05 8,25 8,37
41	12,84 12,05 12,98	11,50 11,79 11,93	10,36 10,68 10,22	9,81 9,03 9,52
44	13,08 13,29 13,44	12,87 12,98 12,72	12,18 12,59 12,25	11,95 11,92 11,94

Fuente: elaborada por las autoras

Los valores promedios de conductividad para cada combinación se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15

Valores promedios de la conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$) del permeado en función de la caída de presión y flujo de alimentación en base a agua de ingreso con $1315 \mu\text{S}/\text{cm}$

ΔP (psi) \ Flujo (m^3/hr)	40	45	50	55
35	10,56	9,56	8,5167	7,7033
38	12,11	10,6267	9,4433	8,2233
41	12,6233	11,74	10,42	9,4533
44	13,27	12,8567	12,34	11,93

Fuente: elaborada por las autoras

Tabla 16

Análisis de la varianza de la variable CONDUCTIVIDAD en los grupos establecidos por las combinaciones de las variables PRESION y FLUJO.

Pruebas de los efectos inter-sujetos

Variable dependiente: CONDUCTIVIDAD

Origen	Suma de cuadrados tipo II	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	139,977 ^a	15	9,332	93,248	,000
Intersección	5507,296	1	5507,296	55031,689	,000
FLUJO	80,506	3	26,835	268,154	,000
PRESION	53,651	3	17,884	178,702	,000
FLUJO * PRESION	5,820	9	,647	6,462	,000
Error	3,202	32	,100		
Total	5650,476	48			
Total corregida	143,180	47			

a. R cuadrado = ,978 (R cuadrado corregida = ,967)

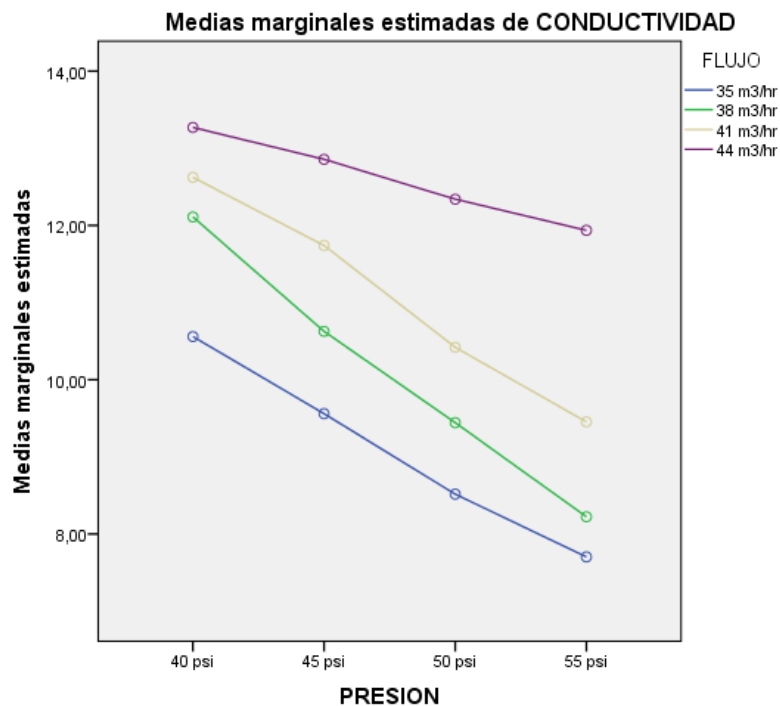


Figura 22. Promedios de la variable CONDUCTIVIDAD en función de la PRESION a diferentes FLUJOS de alimentación de agua al sistema de osmosis inversa.

En la Tabla 16, se presenta el resultado del análisis factorial de la varianza de la conductividad en los grupos establecidos por las combinaciones de los valores de las variables presión y flujo, durante el proceso de osmosis inversa en la planta de Agrolmos. Estos resultados han sido obtenidos con el programa estadístico IBM SPSS. El comportamiento de la CONDUCTIVIDAD respecto a la variable PRESIÓN a diferentes FLUJOS ensayados se presenta en la Figura 22.

3.3 CONTENIDO DE SILICE EN LOS PERMEADOS OBTENIDOS

En base a las 16 combinaciones de flujos de alimentación (en m³/hr) y caídas de presión (psi) durante la osmosis inversa, y realizando tres repeticiones de cada combinación, se obtuvo los resultados del contenido de sílice en el permeado (en ppm de SiO₂) que se muestran en la Tabla 17.

Tabla 17

Variación del contenido de sílice (como ppm de SiO₂) en el permeado en función de la caída de presión y flujo de alimentación durante la OI.

ΔP (psi) \ Flujo (m ³ /hr)	40	45	50	55
35	0,22 0,24 0,21	0,14 0,12 0,11	0,09 0,08 0,06	0,07 0,03 0,05
38	0,26 0,28 0,29	0,21 0,22 0,23	0,15 0,14 0,16	0,12 0,11 0,13
41	0,65 0,63 0,64	0,54 0,52 0,56	0,48 0,49 0,51	0,43 0,41 0,44
44	0,92 0,96 0,98	0,86 0,88 0,85	0,83 0,82 0,84	0,78 0,77 0,79

Fuente: elaborado por las autoras

Los valores promedios del contenido de sílice para cada combinación se presentan en la Tabla 18.

Tabla 18

Valores promedios del contenido de sílice en el permeado (ppm SiO₂) en función de la caída de presión y flujo de alimentación.

ΔP (psi) \ Flujo (m ³ /hr)	40	45	50	55
35	0,2233	0,1233	0,0767	0,050
38	0,2767	0,220	0,150	0,12
41	0,640	0,540	0,4933	0,4267
44	0,9533	0,8633	0,833	0,780

Fuente: elaborado por las autoras

Tabla 19

Análisis de la varianza de la variable SILICE en los grupos establecidos por las combinaciones de las variables PRESION y FLUJO.

Origen	Suma de cuadrados tipo II	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	4,355 ^a	15	,290	1171,108	,000
Intersección	8,585	1	8,585	34629,412	,000
FLUJO	4,138	3	1,379	5563,283	,000
PRESION	,213	3	,071	286,039	,000
FLUJO * PRESION	,005	9	,001	2,073	,063
Error	,008	32	,000		
Total	12,948	48			
Total corregida	4,363	47			

Fuente: elaborado por las autoras

En la Tabla 19 se presenta el resultado del análisis factorial de la varianza de la conductividad en los grupos establecidos por las combinaciones de los valores de las variables presión y flujo, durante el proceso de osmosis inversa en la planta de Agrolmos. Estos resultados han sido obtenidos con el programa estadístico IBM SPSS. El comportamiento del contenido de sílice en función de la variable PRESIÓN a diferentes FLUJOS ensayados se presenta en la Figura 23.

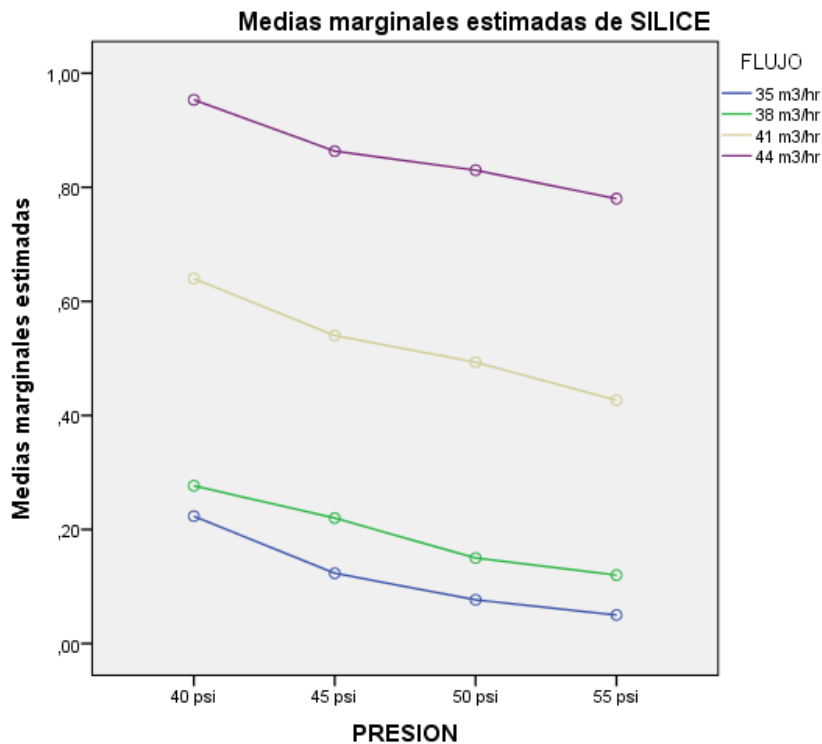


Figura 23. Promedios de la variable SILICE en función de la PRESION a diferentes FLUJOS de alimentación de agua al sistema de osmosis inversa.

3.4 PORCENTAJE DE RECUPERACION DEL PROCESO DE OSMOSIS INVERSA

En la Tabla 20 se presenta los valores calculados del porcentaje de recuperación del proceso de osmosis inversa empleando 16 combinaciones de flujos de alimentación y presiones. En la Tabla 20, se presenta los promedios del porcentaje de recuperación.

El porcentaje de recuperación, como se muestra anteriormente se calcula dividiendo el flujo de permeado entre el flujo de alimentación, ambos valores registrados en línea desde el PLC. Estos valores del porcentaje de recuperación también se muestran en la pantalla del sistema PLC y al mismo tiempo son registrados.

Tabla 20

Variación del porcentaje de recuperación de permeado en función de la caída de presión y flujo de alimentación.

ΔP (psi) \ Flujo (m^3/hr)	40	45	50	55
35	63,29 63,89 63,10	66,52 67,51 67,96	69,21 70,84 70,15	71,42 72,56 72,87
38	60,38 61,41 60,84	62,97 63,04 62,99	65,30 66,72 65,81	68,15 68,02 68,71
41	59,05 58,38 57,97	61,36 61,88 60,11	63,12 64,06 63,74	65,09 66,11 65,47
44	52,64 51,98 52,03	55,92 56,06 55,51	58,23 58,76 59,40	61,05 61,94 62,12

Fuente: elaborado por las autoras

Tabla 21

Valores promedios del porcentaje de recuperación de permeado en función de la caída de presión y flujo de alimentación.

ΔP (psi) \ Flujo (m^3/hr)	40	45	50	55
35	63,4267	67,330	70,0667	72,2833
38	60,730	63,000	65,9433	68,2933
41	58,466	61,1167	63,74	65,5567
44	52,2167	55,8300	58,7967	61,7033

Fuente: elaborado por las autoras

En la Tabla 22 se presenta el resultado del análisis factorial de la varianza del porcentaje de recuperación en los grupos establecidos por las combinaciones de los valores de las variables presión y flujo, durante el proceso de osmosis inversa en la planta de Agrolmos. Estos resultados han sido obtenidos con el programa estadístico IBM SPSS. El comportamiento del porcentaje de recuperación (RECUPERACION) en función de la variable PRESIÓN a diferentes FLUJOS ensayados se presenta en la Figura 23.

Tabla 22

Análisis de la varianza de la variable RECUPERACION en los grupos establecidos por las combinaciones de las variables PRESION y FLUJO.

Pruebas de los efectos inter-sujetos

Variable dependiente: RECUPERACION

Origen	Suma de cuadrados tipo II	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	1242,913 ^a	15	82,861	245,887	,000
Intersección	190718,696	1	190718,696	565951,841	,000
FLUJO	782,413	3	260,804	773,928	,000
PRESION	453,036	3	151,012	448,124	,000
FLUJO * PRESION	7,464	9	,829	2,461	,029
Error	10,784	32	,337		
Total	191972,392	48			
Total corregida	1253,696	47			

a. R cuadrado = ,991 (R cuadrado corregida = ,987)

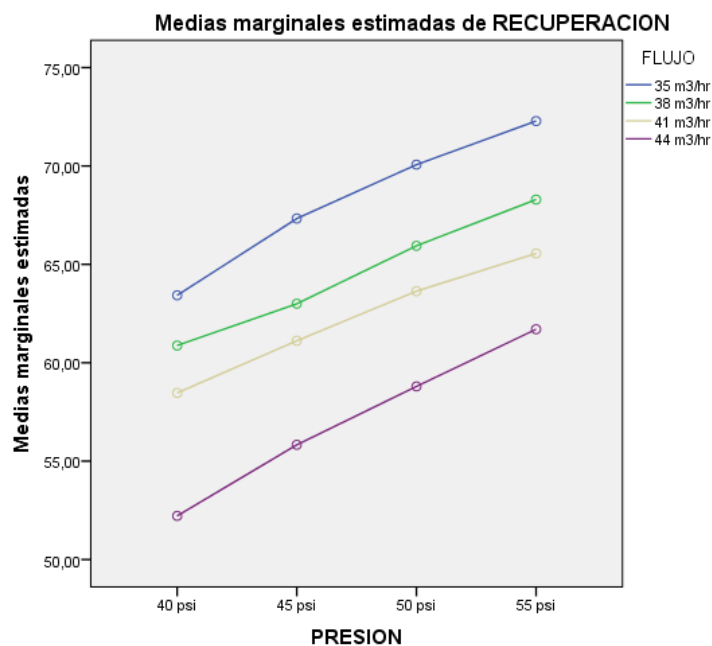


Figura 24. Promedios de la variable RECUPERACION en función de la PRESION a diferentes FLUJOS de alimentación de agua al sistema de osmosis inversa.

IV. DISCUSION

De acuerdo al análisis fisicoquímico del agua de alimentación al sistema de osmosis inversa el contenido de sílice alcanzó un promedio de 45.2 ppm como SiO_2 . Según el informe presentado por Mejias (2012) para IGME, por lo general la concentración de SO_2 en aguas subterráneas sobrepasa 3-8 mg/l. (solubilidad del cuarzo a 25°C) pero en ocasiones puede aproximarse a 100 mg/l. El valor medio, sin embargo, oscila entre 17 y 25 mg/l. Por lo tanto, el agua proveniente de los pozos de agua subterránea de la Empresa Agroindustrial Olmos tiene un nivel alto de sílice.

En la Tabla 14 y 15 se presentan los valores de conductividad obtenidos por las combinaciones de los cuatro flujos de alimentación y 4 presiones de operación. El valor más alto es 13,27 y el más bajo 7,7033 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para 40 psi y 44 m^3/hr , y 55 psi y 35 m^3/hr de caída de presión y de flujo de alimentación, respectivamente. Estos valores representan una disminución en conductividad respecto a la alimentación de agua (1315 $\mu\text{S}/\text{cm}$) de 98,99% y 99,41%, en el orden dado. Estos valores presentados se conocen como rechazo iónico (RI) y están dentro del rango hallado por otros autores. Por ejemplo, Ruiz (2016), logró obtener valores de RI entre 99,8 a 99.65%, cuando utilizo agua de mar como agua de alimentación para un sistema de osmosis inversa con una membrana SW30HR Le-440i, con un flujo de 31 m^3/d . Se considera que el menor flujo permitió al autor obtener RI ligeramente mayores que el presente proyecto.

El análisis de varianza presentado en la Tabla 16, según el valor de significancia, concluye que las variables independientes (flujo y presión) tienen influencia sobre la variable dependiente (conductividad), tanto en forma individual como combinado. Es necesario aclarar que, según los valores de F del análisis de varianza, mayor efecto ejerce el flujo de alimentación, seguido de la diferencia de presión. El efecto combinado de flujo y presión es mucho más bajo. Esta deducción se vuelve a comprobar en la Figura 22 que presenta el efecto de la presión a diferentes flujos ensayados. Se observa en esta figura que, para los flujos de 35, 38 y 41 m^3/hr la disminución de la conductividad conforme aumenta la presión el comportamiento es similar. En cambio, para el flujo de 44 m^3/hr la disminución es más lenta. Este comportamiento permite concluir que para obtener RI más altos se debe trabajar con flujo menor que 44 m^3/hr . Incluso, el mejor valor de conductividad se obtiene a una caída de presión de 55 psi y un

flujo de 38 m³/hr. El valor máximo permitido es 9,4533 µS/cm, y se obtiene con 55 psi de presión y 41 m³/hr.

Los valores del contenido de sílice en los permeados, mostrados en la Tablas 17 y 18, para la mayoría de combinaciones de flujo y presión están dentro del rango aceptable para agua de alimentación a calderas que operan a presiones de 800 psig. El valor promedio para el agua de alimentación para calderas de 800 psig es 0,9 ppm (Gamma Química de Venezuela, C.A. y Dow, 2016). Para un flujo de 44 m³/hr y una caída de presión de 40 psi, el contenido de sílice obtenido es 0,9533 ppm de SiO₂, y es el único valor no aceptable. Para la calidad de agua esperada por la empresa Agrolmos, el resto de combinaciones de flujo de alimentación y caída de presión, los contenidos de sílice son aceptables. Teniendo en cuenta que una mayor caída de presión significa un mayor consumo de energía en la operación del sistema de osmosis inversa, y que es de interés para la empresa obtener el mayor flujo, se recomendaría operar con 38 m³/hr y una caída de presión de 45 psi, con lo cual se obtiene un contenido de sílice de 0,22 ppm, un valor que asegura una operación limpia de la caldera de la empresa.

El análisis factorial de la variable dependiente SILICE, en los grupos establecidos por las combinaciones de las variables PRESION y FLUJO, establece con una confianza de 95%, que existe un efecto significativo de las variables independientes (Flujo y Presión) sobre la variable dependiente (Contenido de sílice). El efecto es sólo independiente de cada variable, porque el efecto combinado de las dos variables es nulo. Según los valores de F encontrados, mayor efecto por si solo ejerce el flujo, seguido de la presión. La Figura 23, vuelve a comprobar la mayor sensibilidad del flujo de alimentación sobre el contenido de sílice en el permeado, tanto que para el flujo de 44 m³/hr la disminución del contenido de sílice con la presión es muy lenta e incluso muy alejada que los otros flujos. Existe similitud para los flujos de 35 y 38 m³/hr.

De acuerdo a los valores mostrados en las Tablas 20 y 21, los porcentajes de recuperación varían desde 52,2167% hasta 72,2833%. El valor de 52,2167% está debajo del rango recomendado por los fabricantes, y se logró con una caída de presión de 40 psi y un flujo de 44 m³/hr. Los otros valores son aceptables y están de acuerdo con BEFESA (2017), fabricante de equipos de osmosis inversa, que indica que el porcentaje de recuperación de permeado debe variar

entre 55 a 70%.

El análisis de la varianza de la variable RECUPERACION en los grupos establecidos por las combinaciones de las variables PRESION y FLUJO (Tabla 22) concluye que con una confianza de 95% que las variables ensayadas tienen efecto tanto individual como combinado sobre la recuperación. El valor de F, establece que mayor efecto tiene el flujo, y menos efecto la presión. El efecto combinado es mucho más bajo. La Figura 24 vuelve a corroborar que la presión tiene un efecto proporcional sobre el porcentaje de recuperación. Con un flujo de 44 m³/hr, el efecto es menor.

V. CONCLUSIONES

- Se concluye que el flujo volumétrico y la variación de presión tiene efecto significativo sobre el contenido de sílice del permeado obtenido por osmosis inversa del agua de pozo de la empresa Agrolmos.

- De las 16 combinaciones de flujo de agua de alimentación (35, 38, 41 y 44 m³/hr) y variación de presión (40, 45, 50 y 55 psi), solo una (44 m³/hr y 35 psi) no cumple con el nivel máximo permitido de sílice en el permeado, ni con el porcentaje de recuperación mínimo.

- De acuerdo al análisis de varianza, las variables independientes ensayadas (flujo de alimentación y caída de presión) tienen efecto individual sobre la variable dependiente (contenido de sílice). No hay efecto combinado.

- El flujo de alimentación tiene un mayor efecto sobre el contenido de sílice que la caída de presión durante el proceso de osmosis inversa.

- La mejor combinación que asegura un nivel aceptable de sílice en el permeado, es 38 m³/hr y una caída de presión de 45 psi.

VI. RECOMENDACIONES

- Operar el sistema de osmosis inversa de la empresa Agrolmos con un flujo de alimentación no mayor a 38 m³/hr y una caída de presión 45 psi.
- Utilizar coagulante específico para sílice coloidal para evitar precipitación de este en las membranas y así alargar el periodo de limpieza.
- Realizar una recuperación efectiva de energía con la presión del agua obtenida, y aprovecharla bien para trasmitirla al agua de entrada al proceso, o bien para accionar algún mecanismo electromecánico.
- Mantener un nivel bajo de iones de hierro, aluminio y manganeso para evitar que la sílice reactiva forme incrustaciones en las membranas, que son muy difíciles de lavar.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

BEFESA Agua, S.A.U. (2017). Análisis de Configuraciones del Proceso O.I. en Desalación. Catalogo.

Cornell Cooperative Extension. (2005). Treatment of water for reverse osmosis. New Cork State Colllege of Human Ecology.

Devora, I., López, M., Fimbres, W., Álvarez, S., Astorga, T. (2016). Desalación por ósmosis inversa y su aprovechamiento en agricultura en el valle del Yaqui, Sonora, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. VII, núm. 3, pp. 155-169. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua Morelos, México.

Gallego, S., Ordoñez, A., Shang, J., Valdivia, D., Del Vigo, F. (2009). Evaluación de diferentes estrategias para la optimización de la operación en sistemas de ósmosis inversa con altas concentraciones de sílice (SiO₂) en la planta desaladora de Arica (Chile). Genesys Membrane Products, Madrid. Informe de la empresa OHL Medio Ambiente INIMA S.A.

Gamma Química de Venezuela, C.A. y Dow. (2016). Limpieza de Membranas de Osmosis Inversa. Catalogo.

Gamma Química de Venezuela, C.A. y Dow. (2009). Sílice en sistemas de Intercambio Iónico. Publicación J-00155185-9.

Hach Lange, (2013). Medición de sílice en el ciclo de agua/vapor y las plantas de desmineralización. Nota de aplicación, energía N° 1. Doc. 04361 30196.

Kang, G., & Cao, Y. (2012). Development of antifouling reverse osmosis membranes for water treatment. *Water Research*, 46, 584-600

Kohan, L. (2000). Manual de calderas, principios operativos de mantenimiento, construcción, instalación, reparación, seguridad, requerimiento y normativas. Vol. 2. McGraw Hill/interamericana de España, Madrid.

Koo, T., Lee, J. y Sheikholeslami, R. (2011). Silica fouling and cleaning of reverse osmosis membranes. *Desalination*, volumen 139, Issues 1-3, pages 43-56. ScienceDirect.

Lezcano, C. y Rosales, C. (2013). Efecto de la variación del porcentaje de

recuperación sobre el contenido de sílice en el permeado y rechazo RO. Tesis de pregrado. Universidad Nacional de Trujillo, Facultad de Ingeniería Química.

Li, D., & Wang, H. (2010). Recent developments in reverse osmosis desalination membranes. *Journal of Materials Chemistry*, 20(22), 4551.

López, M. (2015). Diseño de una planta de tratamiento de agua potable por osmosis inversa para un buque de pasaje. Tesis de pregrado. Escuela Técnica Superior de Náutica. Universidad de Cantabria.

Mejías, M (2012). La composición química de las aguas subterráneas naturales. Departamento de Investigación y prospectiva geocientífica del Instituto Geológico y Minero de España (IGME).

Montaño, S. (2011). Análisis Económico de la Desalinización. Tesis doctoral. Universidad de Alicante, Departamento de Análisis Económico Aplicado.

Pure Agua, Inc. (2012). Tratamiento de Agua y Sistemas de Osmosis Inversa. 2230 South Huron Dr. Santa Ana, CA 92704 USA: Catalogo.

Ortega, J. (2011). La ósmosis inversa como proceso de potabilización en España. XXII Congreso de Centroamérica y Panamá de ingeniería sanitaria y ambiental “superación sanitaria y ambiental: el reto”. Panamá.

Ortiz, D., y Tavera, C. (2013). Tratamiento de agua para alimentación de calderas. Tesis de pregrado. Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas. México, D.F.

Pure Agua, Inc. (2012). Tratamiento de Agua y Sistemas de Osmosis Inversa. 2230 South Huron Dr. Santa Ana, CA 92704 USA: Catalogo.

Ramilo, L, Gómez, S., y Coppari, N. (2010). Tecnologías de proceso para desalinización de aguas. Unidad de Actividad Reactores y Centrales Nucleares – Centro Atómico Constituyentes – Comisión Nacional de Energía Atómica. Argentina.

Ramírez, G. (2010). Consideraciones básicas y viabilidad de procesos de membranas de ósmosis inversa y nanofiltración como alternativa para el tratamiento de agua en Colombia. Monografía. Universidad Nacional de

Colombia, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, departamento de Ingeniería Química.

Reverter, J. y Santi, T. (2015). Parámetros que afecta a las membranas y a los sistemas de osmosis inversa. Hydranautic, a Nitto Denko Corporation.

Ruiz, R. (2016). Desalación de agua de mar en planta termosolar de cilindroparabólico de 50 MW. Tesis de pregrado. Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ETSI), Universidad de Sevilla.

Saleh, T., & Gupta, V. (2012). Synthesis and characterization of alumina nano-particles polyamide membrane with enhanced flux rejection performance.

Tejedor, C. (2008). Módulo Desalación: Introducción a la Desalación por osmosis inversa. Conceptos Básicos. EOI: Escuela de Negocios. España.

VEOLIA WATER. (2017). Osmosis Inversa: soluciones en Osmosis Inversa para la Pequeña y Mediana Industria. Catalogo. www.veoliawatersystems.es

Wagner, J. (2001). Membrane Filtration Handbook, Practical Tips and Hints. 2DA. Edition, Revision2. Osmonics Inc., Minnesota, USA.

- **Direcciones electrónicas**

- 1) Osmosis Inversa

<http://www.hidrotec.cl/PDF/ficha4.pdf>

- 2) Diseño y Soluciones Sostenibles DSS.S.A., Osmosis Inversa

http://dss.com.ec/wp-content/uploads/2012/07/osmosis_inversa.pdf

- 3) Tipos de membranas de osmosis inversa

<https://www.osmosisinversafiltroagua.com/tipos-de-membranas/>

- 4) Membranas fibra hueca disposición en tubo de presión

<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/20398/fichero/Anexos.pdf>.

VII. ANEXOS

ANEXO 1: PRODUCTOS QUIMICOS UTILIZADOS EN EL PROCESO DE O.I.

PROCESO	PRODUCTO	Cantidad	Observaciones
PLANTA TRATAMIENTO DE AGUA O.I.	SIC 9715 (Antincrustante-Dispersante para silice)	1.92 gln/dia	
	SIC 1545 (Biocida compatible con membranas)	0.28 gln/dia	
	E-CLEAN 2270 (Limpiador alcalino para membranas)	45 lb/limpieza	Limpieza cada 4 meses
	E-CLEAN 2340 (Limpiador acido para membranas)	5 gln/limpieza	Limpieza cada 4 meses

ANEXO 2: PORCENTAJE DE RECHAZO POR TIPO DE MEMBRANA

Tipo de membranas	Porcentaje de rechazo
NaCl	96%
NaNO3	93.3%
CaCl2	98.8%
AlCl3	99.2%
NaSO4	99.3%
SiO2	92.3%
CO2	0%

Nota: tomada de Sicrea Perú S.A.(2016)

ANEXO 3: CLASIFICACION SEGÚN LA SALINIDAD

Tipo de Agua	Salinidad
Aguas salobres	Aguas con una salinidad hasta 1.500 ppm.
Aguas de salinidad media	Aguas con una salinidad hasta 3.000 ppm
Aguas de alta salinidad	Aguas con salinidad hasta 10.000 ppm
Aguas de mar:	Aguas con salinidad desde 25.000 ppm

ANEXO 4: QUIMICOS QUE PUEDEN SER UTILIZADOS PARA EL LAVADO DE MEMBRANAS.

ENSUCIAMIENTO	0.1% NaOH, pH 12 y 35°C máx. o 1% Na ₄ EDTA, pH 12 y 35°C.	0.1% NaOH, pH 12 y 35°C máx. o 0.025% Na-DSS y pH 12 y 35°C.	0.2% HCl, 25°C y pH 1-2.	1 % Na ₂ S ₂ O ₄ , 25°C , pH 5.	0.5% H ₃ PO ₄ , 35°C y pH 1-2.	1% NH ₂ SO ₃ H, 25°C y pH 3-4
SALES INORGÁNICAS (CaCO ₃)			PREFERENTE	OPCIONAL	OPCIONA	
SALES INCRUSTANTES (CaSO ₄ , BaSO ₄)	APLICA					
ÓXIDOS METÁLICOS (Ejem. Fierro)				PREFERENTE	APLICA	OPCIONAL
COLOIDES INORGÁNICOS		PREFERENTE				
SÍLICE	OPCIONAL	PREFERENTE				
BIOPELÍCULAS	OPCIONAL	PREFERENTE				
ORGÁNICOS	OPCIONAL	PREFERENTE				

ANEXO 5: PARAMETROS CARACTERISTICOS DEL AGUA, SEGÚN SU PROCEDENCIA.

PARÁMETRO	VALORES CARACTERÍSTICOS			
	Agua de Pozo	Aguas Superficiales	Agua de Mar	OMS
Turbiedad (NTU)	<2	>200	<2	<5
Color (UC)	ausencia	>50	ausencia	<15
Salinidad (ppm)	>.1000	<400	>30.000	<1.000
Sulfatos (ppm)	>200	<50		<400
Cloruros (ppm)	>300	<50	>20.000	<250
Nitratos	>50	<25		<50
Bacterias	ausencia (*)	presencia (*)		ausencia
SDI	<3	>5	<3	<5