

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARRIA “ANTONIO  
NARRO”

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS



**DISEÑO DE UNA PLANTA DESMINERALIZADORA DE AGUA  
SALOBRE PARA UNA INDUSTRIA METALÚRGICA**

POR

CLAUDIA NATALIA GONZÁLEZ GUERRERO

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA  
OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

TORREÓN, COAHUILA

MAYO 2014

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA  
"ANTONIO NARRO"  
UNIDAD LAGUNA  
DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

DISEÑO DE UNA PLANTA DESMINERALIZADORA DE AGUA SALOBRE PARA UNA  
INDUSTRIA METALÚRGICA

Por:

CLAUDIA NATALIA GONZÁLEZ GUERRERO

TESIS

Que somete a consideración del Comité Asesor, como requisito parcial para obtener el  
título de:

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

APROBADA POR:

Asesor principal: \_\_\_\_\_

  
DR. JOSÉ LUIS REYES CARRILLO

Asesor: \_\_\_\_\_

  
DR. ALFREDO OGAZ

Asesor: \_\_\_\_\_

  
ING. EUL MUÑOZ SOTO

Asesor: \_\_\_\_\_

  
ING. RICARDO RODRÍGUEZ ÁVILA

  
DR. FRANCISCO JAVIER SÁNCHEZ RAMOS  
COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS



Coordinación de la División de  
Carreras Agronómicas

TORREÓN, COAHUILA

MAYO 2014

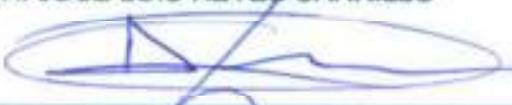
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA  
"ANTONIO NARRO"  
UNIDAD LAGUNA  
DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

TESIS DE LA C. CLAUDIA NATALIA GONZÁLEZ GUERRERO QUE SE SOMETE A LA  
CONSIDERACIÓN DEL H. JURADO EXAMINADOR COMO REQUISITO PARCIAL PARA  
OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

H. JURADO:

PRESIDENTE:   
DR. JOSÉ LUIS REYES CARRILLO

VOCAL:   
DR. ALFREDO OGAZ

VOCAL:   
ING. RUBI MUÑOZ SOTO

VOCAL SUPLENTE:   
ING. RICARDO RODRÍGUEZ ÁVILA

  
DR. FRANCISCO JAVIER SÁNCHEZ RAMOS  
COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS



Coordinación de la División de  
Carreras Agronómicas

TORREÓN, COAHUILA

MAYO 2014

## **DEDICATORIA**

A mi padre Dios, por darme la oportunidad de vivir y terminar mis estudios universitarios.

A mi madre Gloria Guerrero Gallardo por darme todo el esfuerzo de su trabajo y amor para salir adelante.

A mis hermanos Victoria Isabel y César Alejandro que a pesar del tiempo y la distancia son los mejores hermanos que me pudo regalar la vida.

A la memoria de mi abuela materna Isabel Gallardo Flores, que fue el motivo más grande de apoyo, admiración y fortaleza para salir adelante.

A mi novio, compañero e impulsor, por siempre apoyarme en este proyecto de tesis y demás proyectos de vida.

A mis amigas y compañeras: Sarita, Stefy, Verito, Haydee y Carmen.

A todas aquellas personas que han formado parte de mi vida y han creído en mí, gracias.

## AGRADECIMIENTOS

Este proyecto de investigación “Diseño de una planta desmineralizadora de agua salobre para una industria metalúrgica” por Ósmosis Inversa fue elaborado con la intención de hacer conciencia en este momento de nuestras vidas con respecto al cuidado del agua, debido a que continuamente presenciamos con más frecuencia la escasez y contaminación del agua. Por tal motivo se pretende el buscar e investigar sobre las alternativas de tratamiento de agua que sean efectivas para su reúso, ya sea de efluentes de procedencia doméstica, agrícola e incluso industrial para que el agua que pueda ser reutilizada en diversos procesos al cumplir con el rango de calidad deseado.

Agradezco profunda y sinceramente:

A mi **Alma Terra Mater la “Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro”** por haberme brindado las bases e intelecto para desarrollarme profesionalmente; nunca olvidaré la mejor etapa escolar que me otorgó grandes momentos en cada aula y pasillos de ella.

Al **Dr. José Luis Reyes Carrillo** por su enseñanza y apoyo en el asesoramiento de este proyecto de tesis, sin duda uno de los mejores profesores e investigadores que la Universidad puede tener. Gracias también a mis asesores universitarios como a la **Ing. Rubí Muñoz Soto** que siempre fue muy paciente conmigo y el resto del grupo, que sin sus consejos y regaños no nos hubiésemos graduado y gracias al **Dr. Alfredo Ogaz** por esas clases tan buenas y amenas de química.

A todos mis profesores como a la maestra Elba Margarita, gran ejemplo de fortaleza que pudo salir adelante ante un gran reto de la vida, a la Ing. Cynthia Ruedas que siempre alegro las clases con su simpatía, al Ing. Quirino, al Dr. Vicente De Paul, M.C. Amanda Jaramillo y al resto del cuerpo docente y personal que hizo posible este gran reto.

Al Ing. Felipe Islas por sus consejos, por sus pláticas, por darme la confianza y permitirme desarrollar el presente proyecto de investigación en su empresa,

también agradezco a mis compañeros y amigos de Industrias Islas: Ing. Enrique Guzmán, Ing. Juan Carlos Pacheco, Ing. Luis Enrique García, Ing. Jorge Pérez, Ing. Kerim Cerecero, Ing. Lorena Espinoza, Ing. Ricardo Rodríguez, Ing. Bernardo Rendón, Ing. Tadeo Reyna, Ing. Roberto López, Lic. Ernesto Hinojosa, Ing. Marilú Orozco, Ing. Manuel Zarazúa, Ing. Ángel Rivera, Ing. Gerardo Martín, Sr. Antonio Martínez, y al resto de todos y cada uno de compañeros y compañeras que apoyaron en enriquecer mi conocimiento en el ámbito profesional.

A mis amigos: Sarita, Stefy, Verito, Haydee, Carmen, Ucán, Alma, Los Cachivaches y a todos aquellos a los cuales agradezco los mejores momentos dentro y fuera de la universidad, por aquellos momentos de risas, de conciertos, de viajes, pero sobre todo gracias por el apoyo en los momentos más difíciles.

## INDICE

ÍNDICE DE FIGURAS .....	VII
ÍNDICE DE TABLAS .....	VIII
ABREVIATURAS .....	IX
RESUMEN .....	XI
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Objetivo.....	4
2. REVISIÓN DE LITERATURA .....	5
2.1. El agua .....	5
2.1.1. Tipos de agua .....	5
2.1.2. Importancia del agua .....	8
2.2. Recursos hídricos.....	8
2.2.1. ¿Cómo es la situación del agua a nivel mundial?.....	10
2.2.2. ¿Cómo es la situación del agua en la Comarca Lagunera? .....	11
2.3. El uso del agua .....	14
2.3.1. Importancia del reúso del agua.....	15
2.3.2. Uso del agua en la industria minera.....	16
2.3.3. Met-Mex Peñoles y el manejo del agua .....	17
2.4. Contaminación del agua.....	18
2.4.1. Efectos causados por la descarga de desechos.....	19
2.5. Tratamiento de efluentes industriales .....	19
2.6. Procesos de tratamiento de agua por membrana.....	20
2.6.1. Tecnologías de desalinización .....	21
2.7. Antecedentes de la Ósmosis Inversa.....	22
2.8. Equipos de pretratamiento del agua previo al proceso de OI y su importancia .....	23
2.8.1. Sedimentación.....	23
2.8.2. Coagulación y Floculación.....	24
2.8.3. Productos químicos aplicados en el tratamiento de agua .....	24
2.8.3. Filtración de medios.....	25
2.8.4. Microfiltración (MF) y Ultrafiltración (UF).....	26

2.8.5. Filtro pulidor de cartuchos .....	26
2.9. Ósmosis Inversa y su funcionamiento .....	27
2.9.1. Principales componentes de la OI.....	28
2.9.2. Tipos de membrana y materiales .....	28
2.9.3. Características de la membrana.....	29
2.9.4. Configuración de membranas .....	30
2.9.5. Recuperación de sulfato de amonio por OI .....	30
2.9.6. Sistemas de bombeo .....	31
2.9.6.1. Carga Dinámica Total (CDT).....	31
2.10. Consideraciones de la Ósmosis Inversa .....	32
2.10.1. Efecto de la temperatura en el flujo de alimentación .....	33
2.10.2. Ensuciamiento de membrana .....	34
2.10.3. Limpieza de membrana .....	35
2.10.5. Parámetros fisicoquímicos .....	36
2.10.6. Costos de capital de los sistemas de membrana .....	37
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>38</b>
3.1. Área general.....	38
3.2. Localización del sitio de investigación .....	40
3.3. Análisis fisicoquímico del agua y otros parámetros .....	40
3.4. Levantamiento de campo.....	41
3.5. Evaluación de los antecedentes del proyecto.....	42
3.6. Criterios de diseño .....	43
3.7. Diseño de Módulo de Ósmosis Inversa .....	46
3.7.1. Proyección de la simulación en el software ROSA.....	47
3.8. Balance de materia .....	47
3.9. Pretratamiento.....	48
3.9.1 Filtros pulidores .....	49
3.9.2. Dosificación de químicos acondicionantes .....	49
3.10. Selección y dimensionamiento del equipo de bombeo .....	50
3.11. Elaboración de Diagramas de Flujo de Proceso .....	51
3.12. Listado de selección de equipos.....	51

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	52
4.1. Resultados de proyección de simulación software ROSA.....	52
4.2. Resultados de balance de materia por etapas .....	55
4.3. Pretratamiento y acondicionamiento químico .....	59
4.3.1. M.C. de dosificación inhibidor de incrustaciones .....	59
4.3.2. M.C. de dosificación ácido sulfúrico.....	62
4.4. Resultados hidráulicos en el programa PIPE FLOW para selección del equipo de bombeo .....	65
4.5. Descripción de lógica del proceso .....	67
4.6. Descripción del listado seleccionado de equipos.....	72
5. CONCLUSIONES.....	75
6. PERSPECTIVAS.....	76
7. RECOMENDACIONES .....	77
8. LITERATURA CITADA.....	81
ANEXOS .....	86
A.1. Conceptos básicos.....	86
A.2. Memoria de Cálculo sistema de Ósmosis Inversa de software ROSA .....	93
A.3. Hoja de especificaciones de membrana SW30HR LE-400.....	96
A.4. Memoria de Cálculo de recuperador de energía PX-70s .....	98
A.5. Curva de operación de bomba de baja presión .....	99
A.6. Curva de operación de bomba de alta presión .....	100
A.7. Diagrama de Flujo de Proceso en software AutoCAD .....	101
A.8. Manual del usuario del software ROSA. ....	102

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Ciclo hidrológico. ....	9
Figura 2.2. Distribución porcentual del agua en el planeta. ....	11
Figura 2.3. Comarca Lagunera. ....	12
Figura 2.4. Ubicación del acuífero Principal-Región Lagunera. ....	13
Figura 2.5. Diagrama de flujo general del uso del agua en la industria minera. ....	16
Figura 2.6. Relación de consumo de agua de pozo y agua tratada para procesos en Met-Mex Peñoles, S.A. de C.V. ....	18
Figura 2.7. Caudal de aguas residuales industriales tratadas del año 1999-2009. ....	20
Figura 2.8. Procesos de Desalinización (Fuente: Dow Water and Process Solutions).....	22
Figura 2.9. Filtro de Medios. ....	26
Figura 2.10. Diagrama esquemático del proceso de OI.....	27
Figura 2.11. Sección esquemática de una membrana FILMTEC®.....	29
Figura 2.12. Membrana de Ósmosis Inversa. ....	30
Figura 2.13. Función de Intercambiador de presión marca ERI.....	33
Figura 2.14. El control del proceso para la limpieza de la membrana.....	36
Figura 3.1. Ubicación geográfica del municipio Torreón, Coah. ....	39
Figura 3.2. Vista aérea del área de Met-Met Peñoles.....	42
Figura 3.3. Guía de selección de tecnología de tratamiento por concentración de SDT.....	44
Figura 3.4. Espectro de filtración por membrana. ....	45
Figura 3.5. Balance de masa OI. ....	48
Figura 4.1. Diagrama de Flujo de Proceso con balance de materia de planta desmineralizadora de agua salobre. ....	56
Figura 4.2. Diagrama esquemático de programa PIPE FLOW. ....	65
Figura 4.3. Diagrama de Flujo de Proceso para descripción de la planta desmineralizadora de agua salobre. ....	67
Figura 4.4. Vista A de planta de OI instalada en Peñoles.....	70
Figura 4.5. Vista B de planta de OI instalada en Peñoles.....	71

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Productos químicos comunes en procesos de tratamiento de agua.	24
Tabla 3.1. Calidad en el agua bruta.	41
Tabla 3.2. Criterios de diseño de Ósmosis Inversa.	45
Tabla 3.3. Índice de Langelier.	50
Tabla 4.1. Detalles del Sistema.	52
Tabla 4.2. Corrientes.	53
Tabla 4.3. Dureza total de $\text{CaCO}_3$ .	54
Tabla 4.4. Requerimientos de cantidad y calidad de flujo.	54
Tabla 4.5. Parte uno de balance de materia.	56
Tabla 4.6. Parte dos de balance de materia.	57
Tabla 4.7. Parte tres de balance de materia.	57
Tabla 4.8. Parte cuatro de balance de materia.	58
Tabla 4.9. Nomenclatura de tablas de balance de materia.	58
Tabla 4.10. Datos de dosificación de Inhibidor de Incrustaciones.	59
Tabla 4.11. Datos de dosificación de ácido sulfúrico.	62
Tabla 4.12. Datos de selección para bomba de baja presión.	66
Tabla 4.13. Datos de selección para bomba de alta presión.	66
Tabla 4.14. Listado de equipos de pretratamiento.	72
Tabla 4.15. Listado de equipos de bombeo.	72
Tabla 4.16. Listado de equipos de sistema de Ósmosis Inversa.	73

## ABREVIATURAS

CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CDT	Carga Dinámica Total
EPA	Agencia de Protección Ambiental (acrónimo en inglés, Environmental Protection Agency).
ERI	Energy Recovery, Inc.
Ft	Pies
gph	Galones por hora
gpm	Galones por minuto
hm <sup>3</sup>	Hectómetro cúbico
II	Intercambio Iónico
IISA	Industrias Islas S.A. de C.V
INE	Instituto Nacional de Ecología
Km	Kilómetro
kPa	Kilopascal
Km <sup>3</sup>	Kilómetro cúbico
L m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup>	Litros por metro cuadrado por hora
M.C.	Memoria de Cálculo
MF	Microfiltración
mg/l	Miligramo sobre litro
MMP	Met-Mex Peñoles
m <sup>3</sup>	Metro cúbico

m <sup>3</sup> /h	Metro cúbico por hora
NF	Nanofiltración
NTU	Unidades de Turbidez Métricas (acrónimo en inglés, Nephelometric Turbidity Unit).
OI	Ósmosis Inversa
pH	Potencial Hidrógeno
ppm	Partes por millón
psig	Libra por pulgada cuadrada manométrica
PTAR	Planta Tratadora de Agua Residual
ROSA	Análisis de Sistemas de Ósmosis Inversa (acrónimo en inglés, Reverse Osmosis System Analysis).
RPM	Revoluciones por minuto
SDT	Sólidos Disueltos Totales
SIMAS	Sistema Municipal de Aguas y Saneamiento de Torreón, Coahuila
SMN	Sistema Meteorológico Nacional
SST	Sólidos Suspendidos Totales
UF	Ultrafiltración
μS/cm	Microsiemens (unidad de conductividad)

## RESUMEN

El hombre desde hace miles de años ha usado el recurso hídrico para satisfacer sus necesidades; hoy en día a consecuencia de diversos factores como la sobrepoblación, malos procesos industriales, agrícolas y urbanos, este valioso recurso se ha visto fuertemente afectado en cuanto a cantidad y calidad. El tratamiento de agua es una opción viable de suma importancia en todo el mundo, por la necesidad en ascenso debido a las cantidades de agua limitada para su uso directo. La Ósmosis Inversa, es sin duda una de las tecnologías que ha estado vigente por más de medio siglo y que diversos autores siguen hablando de ella gracias a sus múltiples ventajas como: fiabilidad en el proceso de tratamiento, ahorro de energía, son fáciles de diseñar y operar, ocupan menor espacio, tienen bajos requerimientos de mantenimiento, entre otros. Este trabajo de investigación habla sobre el proyecto real del diseño de una planta desmineralizadora de agua salobre en Industrias Peñoles, en el que se aborda toda la literatura con riguroso apego científico y criterios de diseño al que fue sometido para garantizar que la planta sea capaz de rechazar gran cantidad de minerales para su recuperación y producir agua desmineralizada con bajo contenido de SDT para su reúso.

**Palabras clave:** Ósmosis Inversa, tratamiento de agua, agua salobre, recursos hídricos, diseño de procesos.

## 1. INTRODUCCIÓN

El agua, más que un recurso limitado, es el elemento central de la vida de cualquier especie en el planeta. Si bien, 75% de la superficie de nuestro planeta es agua, solamente el 2.5% de este volumen es aprovechable. La disponibilidad de agua promedio anual en el mundo es de aproximadamente 1,386 millones de km<sup>3</sup> de los cuales el 97.5% es agua salada y solo el 2.5% es dulce (Reyes-Vidal *et al.*, 2012).

En México, se tienen problemas de disponibilidad de agua por su distribución fisiográfica y climática, contaminación de aguas superficiales y subterráneas y por el incremento acelerado de las demandas que requieren los diferentes usos (Moeller-Chávez *et al.*, 2002). La región de La Laguna o Comarca Lagunera se ubica en una de las zonas de menor precipitación y mayor evapotranspiración de México. Su entorno árido se compensa con la presencia de los ríos Nazas y Aguanaval, cuyas corrientes han sido empleadas de manera intensiva desde el siglo XIX, etapa en la que se conformó como un área geoeconómica de importancia regional y nacional.

Desde hace muchos años la extracción de agua subterránea ha sido mayor a la recarga, lo cual ha generado una sobreexplotación de los acuíferos por más de 480 hm<sup>3</sup>. Éste es un uso no sustentable del recurso, pues la extracción es mayor a la capacidad de recarga, lo que provoca una inequidad que amenaza a las próximas generaciones por el probable agotamiento del recurso (García-Salazar *et al.*, 2006).

El desarrollo de la región se basó en la explotación irracional del agua, lo que derivó en una grave crisis (Chaparro, 2007). El estudio del agua en la Región Lagunera ha sido abordado desde diferentes enfoques, porque es una de las expresiones fundamentales de la problemática ambiental. Diversos autores han investigado este fenómeno en la región y coinciden en afirmar que una de las

causas de arsénico en el agua se debe a la sobreexplotación de los acuíferos subterráneos (Soto-Balderas y Gómez-Guijarro, 2009).

También es importante mencionar el control de los contaminantes, por ejemplo el del sector minero, ya que puntualmente existen grandes depósitos de residuos (jales y terreros) en las riberas de ríos en distintas localidades del país. Los residuos mineros también aportan contaminantes, principalmente zinc, mercurio, plomo y arsénico, aunque también otros metales y metaloides altamente tóxicos (Cd, Sb, Tl) (CONAGUA, 2012).

Un enfoque preventivo para controlar la contaminación debe necesariamente de comenzaren la industria con el cambio de procesos productivos por tecnologías limpias, minimizar descargas, reciclando y reusando el agua y tratando en forma separada los efluentes con las tecnologías apropiadas que les permitan cumplir con la regulación ambiental aplicable y en los casos que esta calidad lo permita, reutilizarla dentro de la misma industria (Moeller-Chávez *et al.*, 2002).

Del total de aguas residuales generadas en el país, sólo 10% se logra tratar y reutilizar. El tratamiento y reúso de aguas residuales representa una de las principales estrategias para lograr la sostenibilidad de las zonas urbanas y metropolitanas, especialmente en las regiones centro y norte del país. Se trata de un recurso abundante, con el potencial de remplazar aguas subterráneas de primer uso para fines industriales y agrícolas, y de servir para la recuperación de acuíferos sobreexplotados (CONAGUA, 2012).

La meta del tratamiento de aguas debe ser buscar reducir los contaminantes a niveles más seguros de exposición, donde el agua pueda ser reciclada para el riego o usos industriales. Al momento de elegir la tecnología apropiada de tratamiento, debe considerarse cierto número de factores, incluyendo la cantidad, naturaleza y composición de la corriente de residuos, los estándares del efluente, opciones de pretratamiento industrial y factibilidad de funcionamiento, que incluye el análisis de los factores económicos y técnicos (Reyes-Vidal *et al.*, 2012).

Entre las etapas de tratamiento y filtración de agua más comunes, encontramos filtraciones de arena, filtraciones de carbón activado, suavizadores, procesos de microfiltración y el proceso de ósmosis inversa, siendo este último uno de los medios más empleados actualmente para el tratamiento físico - químico que se le da al agua a nivel industrial.

El tratamiento de ósmosis inversa (OI) es un proceso de purificación de agua, en el cual se combinan factores como presión y permeabilización con el fin de separar partículas indeseadas del agua, y lograr obtener agua potable, pura y ultra pura, según sea la necesidad. Este proceso tiene grandes aplicaciones industriales y comerciales, entre las más comunes esta la desalinización de agua de mar para convertirla en agua potable, la reducción de sólidos disueltos para la alimentación en procesos con calderas o sistemas de vapor, la separación y eliminación de virus para las industrias farmacéuticas, entre muchas aplicaciones más (Moreno B., 2011).

Por lo anterior, se decide realizar una investigación sobre una de las tecnologías más desarrolladas durante las últimas décadas. La OI ha sido aprovechada para el tratamiento de agua ya sea para consumo humano o para uso industrial. Además se resalta la importancia de la aplicación de estos sistemas en sectores industriales ubicados en zonas áridas sobre el tratamiento de agua de proceso para su reúso. Debido a lo anterior, se formuló el siguiente objetivo para éste proyecto de tesis:

## **1.1 Objetivo**

Desarrollar el diseño y descripción del proceso de la planta de ósmosis inversa implementado para Industrias Peñoles para la recuperación de sulfatos y cloruros de agua salobre y reúso del agua desmineralizada para procesos.

## 2. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. El agua

El agua (H<sub>2</sub>O) es una molécula formada por dos elementos, hidrógeno y oxígeno. Contiene dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno. La molécula del agua es dipolar: tiene un polo positivo por parte del hidrógeno y uno negativo debido al oxígeno. Los dipolos se forman debido al enlace covalente que une a los dos elementos; esto hace que se forme una carga parcial negativa en la parte del oxígeno de la molécula de agua y una carga parcial positiva en la parte del hidrógeno. Puesto que los átomos de hidrógeno y oxígeno en la molécula contienen cargas opuestas, moléculas de agua vecinas se atraen entre sí. La atracción electrostática entre el hidrógeno y el oxígeno en las moléculas adyacentes se llama enlace de hidrógeno. Esta estructura permite que muchas moléculas iguales se unan con gran facilidad, formando enormes cadenas que constituyen el líquido que da la vida a nuestro planeta (Centro Virtual de Información del Agua, 2012).

#### 2.1.1. Tipos de agua

Existen diferentes tipos de agua, de acuerdo a su procedencia y uso:

- Agua potable: es agua que puede ser consumida por personas y animales sin riesgo de contraer enfermedades.
- Agua salada: agua en la que la concentración de sales es relativamente alta (más de 10,000 mg/l).
- Agua salobre: agua que contiene sal en una proporción significativamente menor que el agua marina. La concentración del total de sales disueltas está generalmente comprendida entre 1,000 – 15,000 mg/l. Este tipo de agua no está contenida entre las categorías de agua salada y agua dulce.
- Agua dulce: agua natural con una baja concentración de sales, generalmente considerada adecuada, previo tratamiento, para producir agua potable.

- Agua dura: agua que contiene un gran número de iones positivos. La dureza está determinada por el número de átomos de calcio y magnesio presentes. El jabón generalmente se disuelve mal en las aguas duras.
- Agua blanda: agua sin dureza significativa.
- Aguas negras: agua de abastecimiento de una comunidad después de haber sido contaminada por diversos usos. Puede ser una combinación de residuos, líquidos o en suspensión, de tipo doméstico, municipal e industrial, junto con las aguas subterráneas, superficiales y de lluvia que puedan estar presentes.
- Aguas grises: aguas domésticas residuales compuestas por agua de lavar procedente de la cocina, cuarto de baño, fregaderos y lavaderos.
- Aguas residuales: fluidos residuales en un sistema de alcantarillado. El gasto o agua usada por una casa, una comunidad, una granja o una industria, que contiene materia orgánica disuelta o suspendida.
- Aguas residuales municipales: residuos líquidos originados por una comunidad, formados posiblemente por aguas residuales domésticas o descargas industriales.
- Agua bruta: agua que no ha recibido tratamiento de ningún tipo o agua que entra en una planta para su tratamiento.
- Aguas muertas: agua en estado de escasa o nula circulación, generalmente con déficit de oxígeno.
- Agua alcalina: agua cuyo pH es superior a 7.
- Agua capilar: agua que se mantiene en el suelo por encima del nivel freático debido a la capilaridad.
- Agua de adhesión: agua retenida en el suelo por atracción molecular, formando una película en las paredes de la roca o en las partículas del suelo.
- Agua de desborde: agua que se inyecta a través de una fisura en una capa de hielo.
- Agua de formación: agua retenida en los intersticios de una roca sedimentaria en la época en que ésta se formó.

- Agua de gravedad: agua en la zona no saturada que se mueve por la fuerza de gravedad.
- Agua de suelo: agua que se encuentra en la zona superior del suelo o en la zona de aireación cerca de la superficie, de forma que puede ser cedida a la atmósfera por evapotranspiración.
- Agua disfórica: agua pobre en nutrientes y que contiene altas concentraciones de ácido húmico.
- Agua estancada: agua inmóvil en determinadas zonas de un río, lago, estanque o acuífero.
- Agua fósil: agua infiltrada en un acuífero durante una antigua época geológica bajo condiciones climáticas y morfológicas diferentes a las actuales y almacenada desde entonces.
- Agua freática: agua subterránea que se presenta en la zona de saturación y que tiene una superficie libre.
- Agua funicular: agua presente en los mayores poros que rodea las partículas del suelo formando, en los puntos de contacto con dichas partículas, anillos que se fusionan entre ellos.
- Agua primitiva: agua proveniente del interior de la tierra que no ha existido antes en forma de agua atmosférica o superficial.
- Agua magmática: agua impulsada hasta la superficie terrestre desde gran profundidad por el movimiento ascendente de rocas ígneas intrusivas.
- Agua metamórfica: agua expulsada de las rocas durante el proceso de metamorfismo.
- Agua vadosa: cualquier agua que aparece en la zona no saturada.
- Agua subterránea: agua que puede ser encontrada en la zona saturada del suelo, zona formada principalmente por agua. Se mueve lentamente desde lugares con alta elevación y presión hacia lugares de baja elevación y presión, como los ríos y lagos.

- Agua superficial: toda agua natural abierta a la atmósfera, como la de ríos, lagos, reservorios, charcas, corrientes, océanos, mares, estuarios y humedales (Centro Virtual de Información del Agua, 2012).

### **2.1.2. Importancia del agua**

El agua es el líquido de los cuales mares, lagos y ríos están compuestos, y que cae en forma de lluvia y cuestiona de los manantiales y que por su amplia presencia en la naturaleza, su papel único en las ciencias de la vida, su importancia en la industria, y su influencia inestimable en la actividad humana, el agua ocupa un lugar insustituible en la historia del hombre. El agua es esencial para la vida (Kalogirou, 2005). Sin agua, muchas reacciones químicas no podían tener lugar, los sistemas biológicos no funcionarían y la vida como la conocemos, no se habría originado (Robinson *et al.*, 1996).

Es un insumo de vital importancia tanto para las áreas de producción y servicios de los sectores económicos, como para la diversidad de procesos productivos industriales, tomando en cuenta la alta calidad requerida para los procesos, enfriamiento, calderas y servicios (CONAGUA, 2012). Es necesario poner a disposición de los consumidores un abastecimiento satisfactorio, haciendo todo lo posible para obtener la mejor calidad que la tecnología permita (Leal-Ascencio, 2005).

### **2.2. Recursos hídricos**

El origen y la continuación de la humanidad se basan en el agua. El agua es uno de los recursos más abundantes en la tierra (Kalogirou, 2005). Ahora con el rápido aumento de la demanda de éste recurso, la escasez de agua dulce se ha convertido en un problema importante que afecta el desarrollo económico y social en muchos países (Kang y Cao, 2012). Es debido a esto que el

tratamiento de aguase convierte en uno de los medios preferidos para aumentar los recursos hídricos (Abdul-Hamid, 2011).

La evaluación de la cantidad de agua en el planeta es complicada debido a que es un recurso dinámico en el tiempo y espacio. El ciclo hidrológico es un proceso a través del cual se pueden analizar la dinámica del agua en sus diferentes manifestaciones en forma de precipitación, evaporación, infiltración y escurrimiento (**Figura 2.1**). No obstante, los tiempos de formación del agua son variables: los océanos requieren 2,500 años, el permafrost y hielo polar 10,000 años; y las aguas subterráneas profundas y los glaciares de las montañas 1,500 años. A este tipo de aguas se les considera como estáticas dentro del ciclo hidrológico. En cambio, los lagos (medianos y pequeños) requieren 17 años o menos para reemplazar el agua; y los ríos aproximadamente 16 días. Ambos son considerados como recursos renovables y por tanto como elementos dinámicos dentro del ciclo hidrológico (INE, 2002).



**Figura 2.1.** Ciclo hidrológico.

### **2.2.1. ¿Cómo es la situación del agua a nivel mundial?**

Hoy en día, el acceso a agua potable se está convirtiendo en una tarea difícil en muchas regiones del mundo. Según la Organización Mundial de la Salud, 1,200 millones de personas carecen de acceso a cantidades suficientes de agua limpia y fresca, y 2.6 billones carecen de saneamiento adecuado (Kasher, 2009). El agua se está convirtiendo, en muchas regiones del mundo, en un factor limitante para la salud humana, la producción de alimentos, el desarrollo industrial y el mantenimiento de los ecosistemas naturales y su biodiversidad, e incluso para la estabilidad social y política.

A pesar de que 70% de la superficie del planeta está compuesta por agua, 97.5% de ésta es salina (cerca de 1,400 millones de km<sup>3</sup>), contenida principalmente en los océanos, y sólo 2.5% es agua dulce (alrededor de 35 millones de km<sup>3</sup>) (EPA, 1987). De este pequeño porcentaje de agua de la Tierra (Kalogirou, 2005), el 68.9% se encuentra congelada (en bancos de hielo, glaciares y nieves perpetuas) y en la humedad del suelo; 30.8% se almacena en aguas subterráneas, y poco menos de 0.3% es agua superficial localizada en lagos, lagunas, ríos y humedales.

El agua disponible para el planeta Tierra es la misma agua que siempre ha estado disponible y la única agua que siempre estará disponible (EPA, 1987). Sin embargo, algunos de los recursos de agua dulce existentes están contaminados de forma gradual y no están disponibles debido a las actividades humanas o industriales. Se espera que los problemas con el agua empeoren en las próximas décadas, con la escasez de agua que ocurre en todo el mundo, incluso en las regiones que actualmente se consideran ricos en agua (Kang y Cao, 2012).



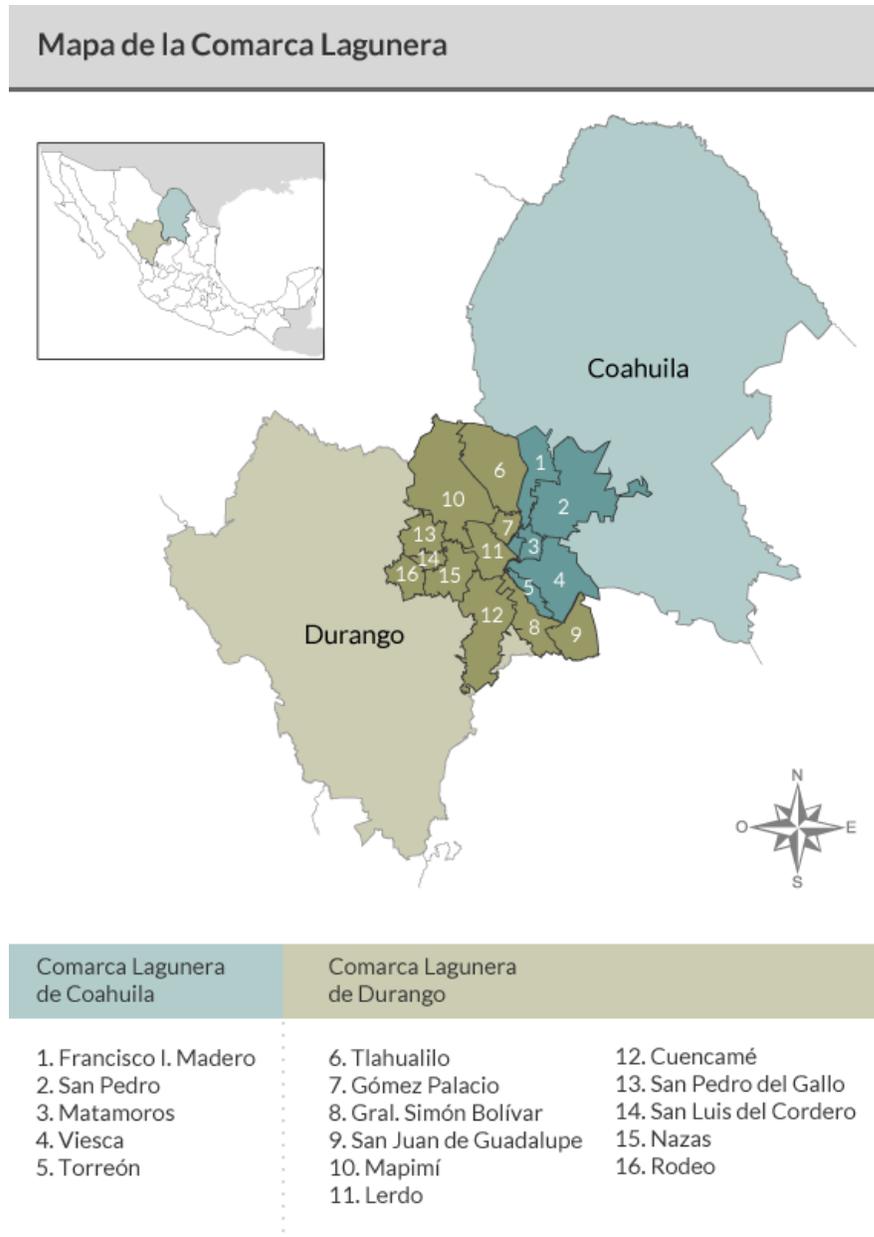
**Figura 2.2.** Distribución porcentual del agua en el planeta.

Los problemas actuales relacionados con el agua son muy severos en el mundo. En muchas regiones la disponibilidad natural es crítica, la calidad es inapropiada, los servicios son insuficientes, no alcanza la inversión económica para cubrir los rezagos y menos aún para atender la demanda creciente; las actividades productivas compiten por el agua, y el cambio climático incrementa la vulnerabilidad de los ecosistemas y de las personas en un gran número de países (Carabias *et al.*, 2005).

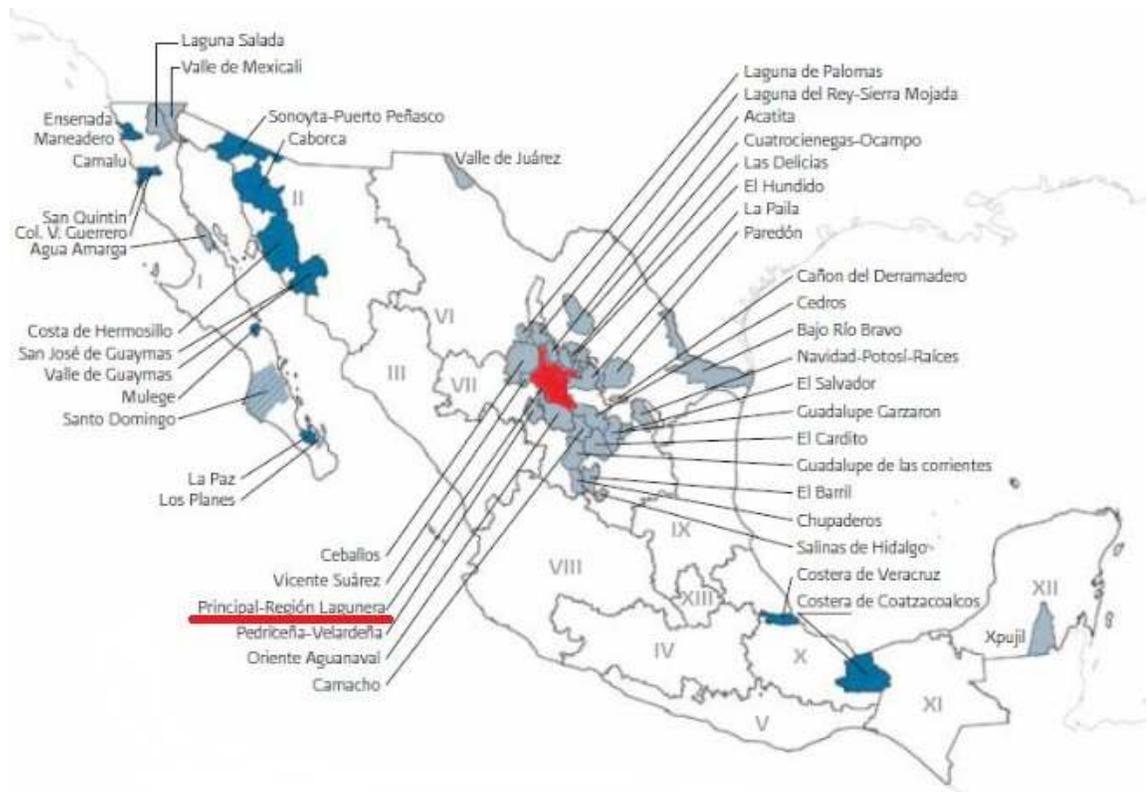
### 2.2.2. ¿Cómo es la situación del agua en la Comarca Lagunera?

La Comarca Laguna se ubica en la parte centro-norte de la República Mexicana (**Figura 2.3**), en los límites de los estados de Coahuila y Durango. Está formada por 16 municipios, 11 de los cuales pertenecen a Durango: Gómez Palacio, Lerdo, Tlahualilo, Mapimí, Rodeo, Nazas, Simón Bolívar, Cuencamé, San Juan

de Guadalupe, San Luis del Cordero y San Pedro del Gallo; y cinco municipios pertenecientes a Coahuila: Torreón, San Pedro de las Colonias, Matamoros, Francisco I. Madero y Viesca. En esta región, la mayor fuente de aguas subterráneas es el Acuífero Principal (**Figura 2.4**), que forma parte de las 653 unidades hidrogeológicas o acuíferos registrados en todo el país, y está incluido en los 102 que se encuentran sobreexplotados (Chaparro, 2007).



**Figura 2.3.** Comarca Lagunera.



**Figura 2.4.** Ubicación del acuífero Principal-Región Lagunera.

En la Comarca Lagunera hay ocho acuíferos, pero el más importante es el Principal, que abarca a los municipios de Torreón, San Pedro y Matamoros, en Coahuila; Lerdo y Gómez Palacio, por Durango (Canedo, 2013).

Sin embargo el deterioro de los mantos acuíferos ha comenzado a afectar la producción del norte de México, donde se encuentra el mayor dinamismo de la economía (García-Salazar *et al.*, 2006). La Comarca Lagunera es, sin duda alguna, una de las regiones más prósperas de México. En la producción pecuaria ocupa un lugar relevante en la ganadería de leche, carne de pollo y huevo. La minería está en los primeros sitios en la exportación de oro, plata y minerales no ferrosos, a través de la industria Peñoles. La producción textil es importante debido a que es la principal exportadora nacional de mezclilla (García-Salazar y Mora-Flores, 2008).

Como ocurre en otras latitudes, la actividad agrícola consume la mayor parte del hídrico disponible. En La Laguna el uso agrícola emplea 81.3% del agua extraída del Acuífero principal, hecho que ha derivado en un grave abatimiento del manto freático y el deterioro de su calidad (Soto-Balderas y Gómez-Guijarro, 2012), donde los métodos de riego siguen siendo los mismos que hace 100 años y el aprovechamiento del líquido es mínimo (Canedo, 2013). En efecto, dadas las características geológicas de la región, la sobreexplotación ha favorecido la concentración de metaloides como el arsénico, rasgo ya sistemático en pozos que abastecen a los municipios de Torreón, Matamoros y Francisco I. Madero, en Coahuila, y de Gómez Palacio, Ciudad Lerdo y Tlahualilo, en Durango, entre otros (Soto-Balderas y Gómez-Guijarro, 2012).

La Comarca Lagunera es una de estas regiones, en las que el agua es un recurso escaso que limita la actividad económica. Desde hace muchos años la extracción de agua subterránea ha sido mayor a la recarga, lo cual ha generado una sobreexplotación de los acuíferos por más de 480 hm<sup>3</sup> (García-Salazar *et al.*, 2006).

### **2.3. El uso del agua**

Según (Carabias *et al.*, 2005) los usos del agua se dividen en consuntivos y no consuntivos. Los consuntivos son aquéllos en los que el agua es transportada a su lugar de uso y la totalidad, o parte de ella, no regresa al cuerpo de agua. En los usos consuntivos una porción del agua se evapora o transpira, o es incorporada a los productos o cosechas, utilizada para el consumo humano o del ganado, o retirada de otra forma del ambiente acuático inmediato, por lo que una parte no vuelve a la corriente o a las aguas subterráneas justo después de ser usada. Los usos no consuntivos son aquéllos en los que el agua se utiliza en el mismo cuerpo de agua o con un desvío mínimo, por lo que regresa al entorno inmediatamente después de haberse utilizado, aprovechado o explotado, aunque, en ocasiones, regrese con cambios en sus características

físicas, químicas o biológicas. La generación de energía eléctrica es el principal uso no consuntivo, además del recreativo o turístico y la acuicultura.

- **Agropecuario.** El agua extraída para uso agropecuario es 77% de la extracción total. El agua que se extrae para la agricultura y no llega a utilizarse equivale a más de tres veces el volumen que se destina al abastecimiento público, que incluye el uso urbano y el doméstico.
- **Uso para abastecimiento público.** El agua utilizada para abastecimiento público es de 9.6 km<sup>3</sup>, es decir 13% del total extraído, y 70% de este volumen proviene del subsuelo.
- **Industrial.** Si bien la industria autoabastecida sólo consume 10% del agua total (7.3 km<sup>3</sup> anuales).

### 2.3.1. Importancia del reúso del agua

El consumo y contaminación desmedida del agua en la elaboración de productos industriales es un problema ambiental que requiere de estrategias inmediatas relacionadas con el abastecimiento y tratamiento de los efluentes residuales para su reúso (Muro *et al.*, 2009). El reúso industrial aquí en México se practica desde 1956 y el reúso del agua para fines municipales, para el riego de áreas verdes, desde 1958. En ese sentido México es pionero en el tema del reúso, hecho que no es muy conocido (Estrada, 2011).

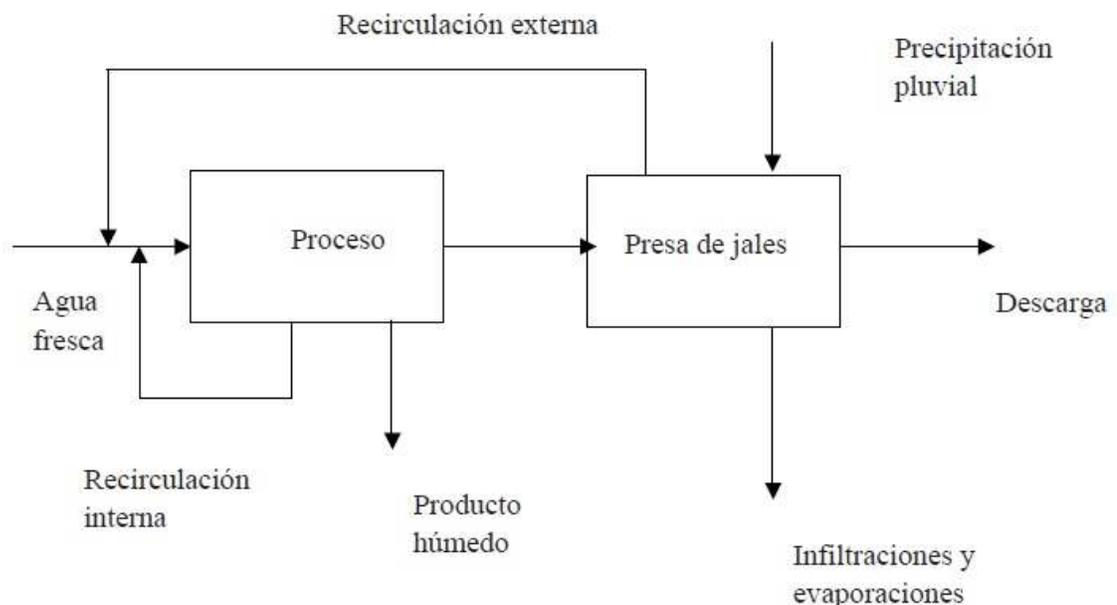
La idea ahora es tratar el agua no sólo para retornarla al ambiente, cuidando que no tenga ningún efecto nocivo en él, sino también para darle un nuevo uso. Hay dos tipos de reúso: uno que llamamos directo y otro, indirecto. El reúso directo es cuando se trata el agua e inmediatamente se dispone de ella, mientras que el reúso indirecto es cuando se le da tratamiento para cualquier otro tipo de reúso.

El reúso de agua residual tratada puede ser una alternativa ante el agotamiento de las fuentes de abastecimiento de agua potable. Simple y sencillamente

porque la cantidad de agua que existe es la misma y cada vez hay más población. El hecho de que haya más población indica que necesitamos más alimentos y entonces necesitamos más agua de riego para producirlos. A esto hay que agregar que hemos ido desarrollando el concepto de un mejor nivel de vida con un mayor consumo de agua (Estrada, 2011).

### 2.3.2. Uso del agua en la industria minera

La minería mexicana comprende la explotación de metales preciosos, metales industriales, minerales metálicos y no metálicos, y metales obtenidos como subproductos. El uso del agua en la minería se ejemplifica en la **Figura 2.5**.



**Figura 2.5.** Diagrama de flujo general del uso del agua en la industria minera.

El agua recuperada del proceso puede ser reciclada y mezclada con agua fresca. A esto se le conoce como reciclaje interno. También es posible reciclar parte del agua acumulada en la presa de jales. A esto se le conoce como reciclaje externo. Ambas recirculaciones, afectan la composición de la corriente

de alimentación del agua y determinarán la cantidad de agua fresca utilizada (Pacheco-Gutierrez y Durán-Dominguez de-Bazúa, 2007).

### **2.3.3. Met-Mex Peñoles y el manejo del agua**

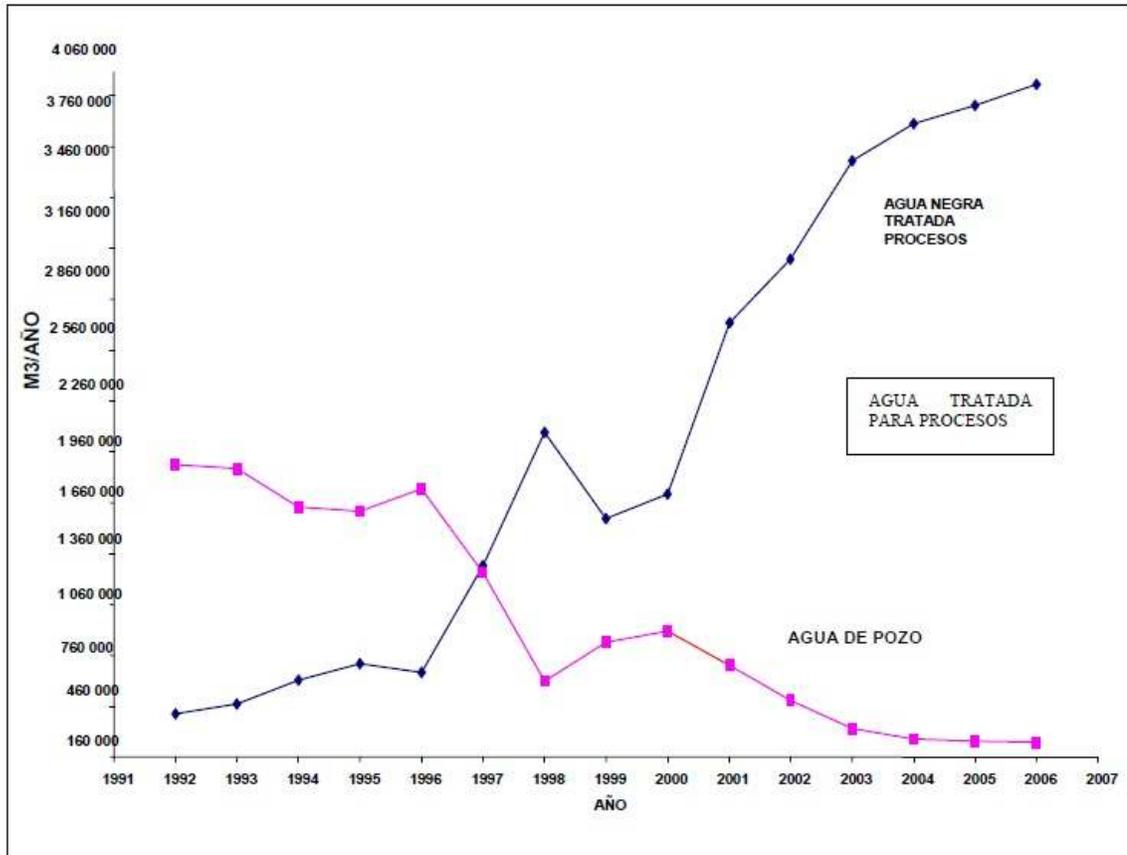
Peñoles inició operaciones en 1887 como una empresa minera. Es el mayor productor mundial de plata afinada, bismuto metálico y sulfato de sodio; opera el complejo metalúrgico no ferroso más grande de América Latina y el cuarto a nivel mundial en términos de valor de su producción. Ocupa una posición dominante en el mercado nacional de oro, plomo y zinc afinados, óxido de magnesio, sulfato de amonio y de magnesio. En 1991 como resultado de la privatización de la industria de los fertilizantes en México, Peñoles adquiere la planta productora de sulfato de amonio ubicada en la ciudad de Torreón, Coahuila, contigua a la planta metalúrgica, iniciándose así su participación en el mercado nacional de fertilizantes (Molina y Araiza, 2011).

En 1994, Met-Mex Peñoles recibió los derechos de agua de cuatro pozos para su propio abastecimiento, los cuales se acreditan por medio de un título de concesión expedido por la Comisión Nacional de Agua (CNA), e inscrito en el Registro Público de Derechos de Agua. Esta concesión tiene una vigencia de 50 años, contados a partir de su expedición.

Por la escasa disponibilidad de agua en la región de la Comarca Lagunera y por la certeza de las necesidades de la población del vital líquido, Met-Mex Peñoles construyó una ampliación a la PTAR y cede sus derechos sobre estos pozos al SIMAS. Esta cesión de derechos incluye el equipo de extracción, conducción y medición, así como la energía eléctrica que su operación requiere.

El convenio incluye el compromiso del SIMAS de suministrar aguas residuales de la red de drenaje municipal a Met-Mex, con el fin de que ésta las depure y aproveche un volumen determinado en sus procesos industriales y servicios, y

entregue al SIMAS un volumen de 6 l/s para irrigar el Parque Municipal Venustiano Carranza (Chaparro, 2007).



**Figura 2.6.** Relación de consumo de agua de pozo y agua tratada para procesos en Met-Mex Peñoles, S.A. de C.V.

#### 2.4. Contaminación del agua

Las fuentes más importantes de contaminantes son las descargas industriales y municipales, otra fuente que puede ser importante localmente son las descargas difusas de origen agrícola (Leal-Ascencio *et al.*, 2009). En una escala global, la contaminación artificial de las fuentes naturales de agua se está convirtiendo en una de las mayores causas de la escasez de agua dulce (Kalogirou, 2005).

### **2.4.1. Efectos causados por la descarga de desechos**

La problemática de las aguas residuales industriales es un factor muy relevante para el saneamiento de los ríos, tanto por la diversidad generada como por el alto grado de contaminantes que deben ser tratados de manera particular. Gran parte del sector industrial tiende aún a descargar aguas contaminadas, resultado de su cadena de producción (CONAGUA, 2012).

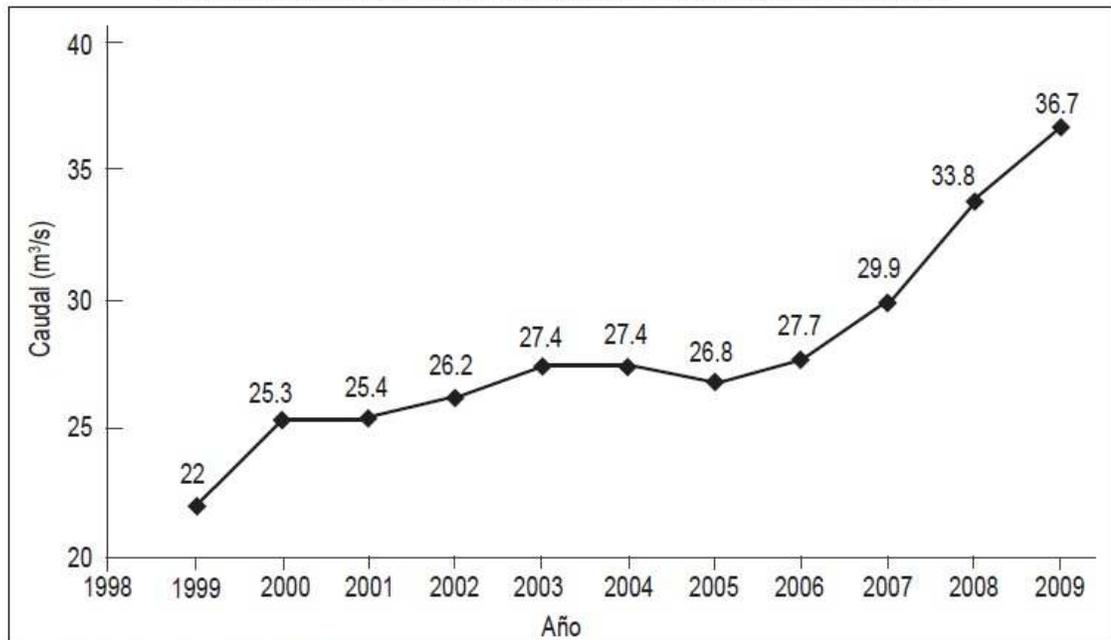
### **2.5. Tratamiento de efluentes industriales**

La industria es uno de los principales motores de crecimiento y desarrollo económico. En México, en cuestión de aguas residuales industriales, se estima que en el año 2008 se generaron 178 m<sup>3</sup>/s, de los cuales únicamente se trataron 15% en cerca de 1,800 plantas de tratamiento, mientras que los 151 m<sup>3</sup>/s restantes fueron descargados a cuerpos receptores sin ningún tratamiento. Al 2009, se estima que se trataron 19.3% de las aguas residuales generadas, tanto municipales como industriales.

La meta del tratamiento de aguas debe ser buscar reducir los contaminantes a niveles más seguros de exposición, donde el agua pueda ser reciclada para el riego o usos industriales.

En los proyectos se persigue, tanto el tratamiento efectivo de los efluentes, ya sea para la descarga del efluente reducido en sus contaminantes o la posibilidad de obtener agua de reúso (**Figura 2.7**), como la recuperación de productos residuales de alto valor que suelen contener dichos efluentes (Reyes-Vidal *et al.*, 2012). Varios son los métodos utilizados en el tratamiento de las aguas y el empleo de cada uno de ellos depende del objetivo que se persiga con el agua tratada (Valdivia-Medina *et al.*, 2010).

Gráfica 1. Caudal de aguas residuales industriales tratadas del año 1999 al 2009



Fuente: adaptado de Conagua, 2011.

**Figura 2.7.** Caudal de aguas residuales industriales tratadas del año 1999-2009.

## 2.6. Procesos de tratamiento de agua por membrana

El uso de membranas en el tratamiento de agua y aguas residuales ha aumentado dramáticamente desde 1990 y seguirá creciendo en el futuro a medida que avanza la tecnología de fabricación de la membrana y disminuyen los costos de capital y operativos de las membranas.

La aplicación de diferentes sistemas de membrana se basa en el tamaño de poro para la eliminación de contaminantes. Las membranas se fabrican con un tamaño de poro distinto, y por lo tanto se seleccionan sobre la base de los contaminantes que están diseñados para eliminar.

La selección de un proceso de membrana se determina por el deseo de tratamiento, tales como reducción de la turbidez, la desinfección, eliminación de

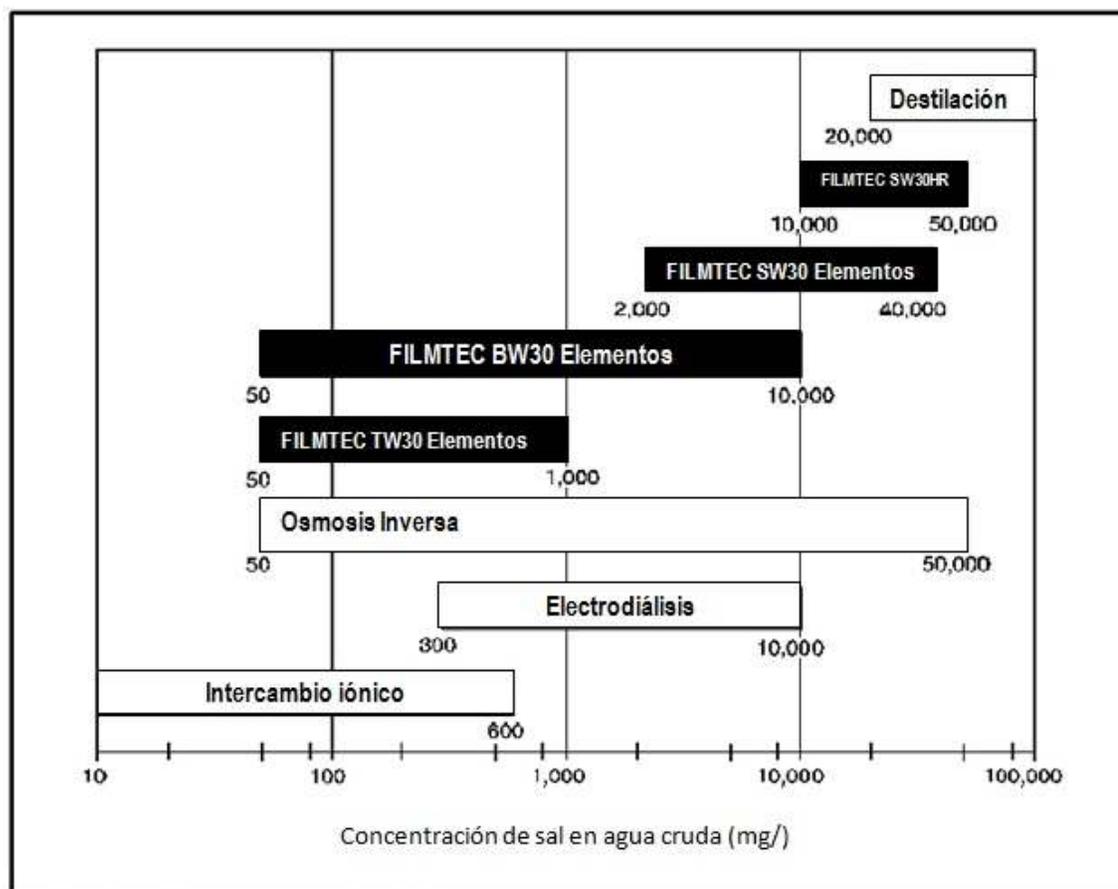
compuestos orgánicos, de ablandamiento, de desalinización, o la separación de ion específico (Viessman *et al.*, 2009).

### **2.6.1. Tecnologías de desalinización**

La desalación puede conseguirse mediante el uso de un número de técnicas para separar el disolvente o algunos solutos (Kalogirou, 2005), la cual produce agua dulce a partir del agua de mar o agua negruzca; es cada vez mayor ya que la cantidad de agua dulce está disminuyendo rápidamente debido a la contaminación de las fuentes de agua, tales como ríos y lagos causados por el rápido desarrollo de la industria y la agricultura, mientras que la demanda del agua fresca es cada vez mayor (Tanaka y Ho, 2010).

Fuera de los varios procesos de desalinización considerados, ósmosis inversa, intercambio iónico, destilación y electrodiálisis son los principales procesos utilizados en la desalinización. De menor importancia debido a su aplicación práctica, así como su operación menos beneficiosa, son la congelación del refrigerante, congelación al vacío, compresión de vapor y piezodiálisis.

Hoy en día, las membranas de ósmosis inversa (OI) son la tecnología líder para la desalinización (Pangarkar *et al.*, 2011). Es, en general, el proceso más económico para la desalinización de agua de mar y agua salobre (**Figura 2.8**) (FILMTEC, 2012); importante para las industrias que requieren de agua de ultra alta calidad para su funcionamiento a mejor costo (Abdul-Hamid, 2011).



**Figura 2.8.** Procesos de Desalinización (Fuente: Dow Water and Process Solutions).

## 2.7. Antecedentes de la Ósmosis Inversa

Desde el desarrollo de las primeras membranas prácticas de acetato de celulosa en la década de 1960 y el posterior desarrollo de película delgada, membranas de material compuesto, los usos de ósmosis inversa se han ampliado para incluir no sólo el proceso de desalinización tradicional, sino también una amplia variedad de aplicaciones de tratamiento de aguas residuales (Williams, 2003).

Como una tecnología ampliamente aceptada, la ósmosis inversa se hizo cada vez más competitiva y es superior a la del proceso térmico tradicional, cuando

se hace una comparación de la inversión de capital y el consumo de energía (FILMTEC, 2012).

Varios procesos de membrana han obtenido recientemente el reconocimiento como tecnologías viables para el desarrollo de los recursos hídricos sostenible; por ejemplo, recuperación de aguas residuales, agua de mar y la desalación de agua salobre, debido a la calidad del agua y la rentabilidad fiable (Chon *et al.*, 2012), también ha sido ampliamente utilizada para la separación y concentración (recuperación) de los solutos en muchos campos (Garud *et al.*, 2011).

Es gracias a esto que la OI ha sido ampliamente utilizada hasta ahora, como una de las principales tecnologías para el tratamiento de agua (Kang y Cao, 2012) debido a los recientes avances en la química de materiales y la química de polímeros, junto con la necesidad de procesos de bajo consumo energético (Kasher, 2009).

## **2.8. Equipos de pretratamiento del agua previo al proceso de OI y su importancia**

Un estudio demostró que utilizando los sistemas de filtración, micro y ultrafiltración entre otros como etapas de pretratamiento de agua de mar para la ósmosis inversa puede mejorar la calidad del agua de alimentación (Goosen *et al.*, 2004).

### **2.8.1. Sedimentación**

Sedimentación (clarificación) es la remoción de partículas sólidas de suspensión por gravedad. En el tratamiento de agua, la aplicación común de la sedimentación es después de un tratamiento químico para remover las impurezas floculadas y precipitadas (Viessman *et al.*, 2009).

### 2.8.2. Coagulación y Floculación

La coagulación es el proceso de adición de productos químicos para recoger pequeñas partículas y materia orgánica que se podrán extraer de la solución posteriormente con sedimentación y a través de filtración de medios (Viessman *et al.*, 2009). Se utiliza para eliminar la turbidez del agua mediante la adición de compuestos catiónicos, es otro método de uso común. La utilidad de la coagulación como un pretratamiento para eliminar micropartículas en suspensión acuosa antes de una filtración de membrana (Goosen *et al.*, 2004).

La floculación es la agitación de las aguas tratadas químicamente para inducir el crecimiento de partículas de las partículas en suspensión muy pequeñas de floculos más pesados más grandes que se depositan por gravedad (Viessman *et al.*, 2009). Éste puede formar una torta de filtración altamente porosa sobre una superficie de la membrana. Esto ayudará a inhibir las incrustaciones en la membrana mediante la prevención de la deposición de partículas y por lo tanto reduce el número de ciclos de limpieza de membrana (Goosen *et al.*, 2004).

### 2.8.3. Productos químicos aplicados en el tratamiento de agua

Los compuestos inorgánicos comunes utilizados en proceso de tratamiento de agua se enumeran en la Tabla 2.1. Teniendo en cuenta el nombre, la fórmula y el uso común (Viessman *et al.*, 2009).

**Tabla 2.1.** Productos químicos comunes en procesos de tratamiento de agua.

Nombre	Fórmula	Aplicación común
Ácido sulfúrico	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Ajuste de pH
Aluminato de sodio	NaAlO <sub>2</sub>	Coagulación
Amonio	NH <sub>3</sub>	Desinfección con cloramina
Bicarbonato de sodio	NaHCO <sub>3</sub>	Ajuste de pH
Carbón activado	C	Control de sabor y olor
Carbonato de sodio	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Suavización
Cloro	Cl	Desinfección, oxidación
Cloruro de sodio	NaCl	Regeneración de intercambio iónico

Nombre	Fórmula	Aplicación común
Cloruro férrico	FeCl <sub>3</sub>	Coagulación
Dióxido de azufre	SO <sub>2</sub>	Decloración
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	Recarbonatación
Dióxido de cloro	Cl <sub>2</sub>	Control de sabor y olor
Hexametafosfato de sodio	(NaPO <sub>3</sub> ) <sub>n</sub>	Control de corrosión
Hidróxido de calcio	Ca(OH) <sub>2</sub>	Suavización, ajuste de pH
Hidróxido de sodio	NaOH	Ajuste de pH
Hipoclorito de calcio	Ca(ClO) <sub>2</sub> • 2H <sub>2</sub> O	Desinfección, oxidación
Hipoclorito de sodio	NaClO	Desinfección
Óxido de calcio	CaO	Suavización, ajuste de pH
Oxígeno	O <sub>2</sub>	Aeración
Ozono	O <sub>3</sub>	Desinfección, oxidación
Permanganato de potasio	KMnO <sub>4</sub>	Oxidación
Silicato de sodio	Na <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub>	Ayudante de coagulación
Sulfato de aluminio	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> • 14.3 H <sub>2</sub> O	Coagulación
Sulfato de amonio	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Coagulación
Sulfato de cobre	CuSO <sub>4</sub>	Control de algas
Sulfato férrico	Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	Coagulación
Sulfato ferroso	Fe <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> • 7H <sub>2</sub> O	Coagulación
Tiosulfato de sodio	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Decloración

### 2.8.3. Filtración de medios

Es el proceso más simple de separación, en el cual un material poroso actúa como barrera. El agua es forzada a pasar a través de este material reteniendo los sólidos suspendidos (Valenzuela-Marín, 2004). La filtración se puede lograr por el uso de varios tipos de medios, tales como arena, grava, antracita, cáscara de nuez y otros (**Figura 2.9**). Este proceso no se ve afectado por la salinidad del agua y puede ser aplicado a cualquier tipo de agua producida. La eficiencia puede mejorarse aún más si se añaden los coagulantes al agua de alimentación antes de la filtración (Igunnu y Chen, 2013).



**Figura 2.9.** Filtro de Medios.

#### **2.8.4. Microfiltración (MF) y Ultrafiltración (UF)**

Tanto MF y UF pueden servir como un pre-tratamiento a la desalación, pero no pueden eliminar la sal del agua (Igunnu y Chen, 2013).

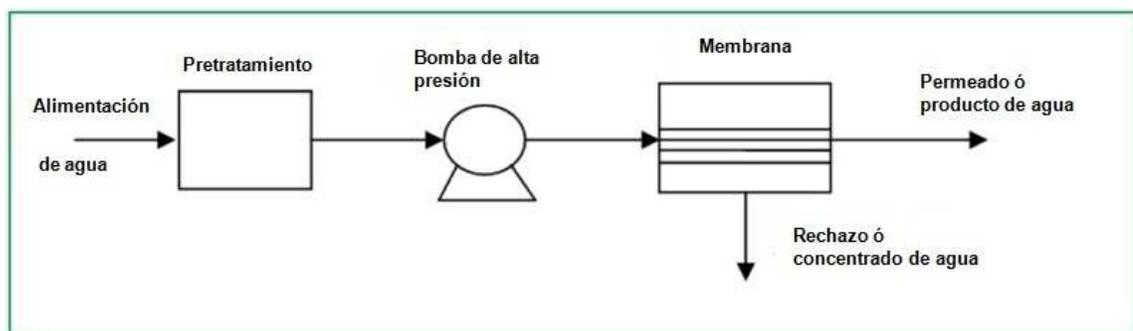
#### **2.8.5. Filtro pulidor de cartuchos**

Este elemento está construido de polipropileno extruido y tiene como función pulir el agua de partículas con diámetro mayor a 1 (una) micra, es decir, retener todas aquellas partículas que físicamente logran pasar a través de la filtración de medios con radio de 1 a 10 micras de diámetro. Esto con el fin de disminuir la posibilidad de incrustaciones en las membranas, que provoquen una disminución en la eficiencia de la membrana y que alteren la calidad del agua producto (Guzmán-Castro, 1998).

## 2.9. Ósmosis Inversa y su funcionamiento

La ósmosis inversa es un proceso impulsado por presión mediante el cual una membrana semi-permeable rechaza constituyentes disueltos en el agua de alimentación (Kang y Cao, 2012) como sólidos disueltos, metales pesados, los contaminantes orgánicos, los virus, bacterias y otros contaminantes disueltos (Abdul-Hamid, 2011), pero permite el paso del agua a través de ella (Kang y Cao, 2012). El solvente pasa espontáneamente de una solución menos concentrada a otra más concentrada a través de una membrana semipermeable, que al aplicar una presión mayor que la presión osmótica a la solución más concentrada, el solvente comenzara a fluir en el sentido inverso (Moreno B., 2011).

Es de diseño simple que consiste en alimentación, que separara una solución en dos corrientes (Pérez-González *et al.*, 2012); permeado y corriente de rechazo. Para el agua de alimentación es necesario proporcionar pretratamiento con el fin de eliminar los sólidos suspendidos e inorgánicos con el uso de una bomba de alta presión para enviar el flujo de alimentación a través de la membrana semi-permeable (**Figura 2.10**). Dependiendo de dónde se utilizara el permeado se le dará un tratamiento posterior (Garud *et al.*, 2011).



**Figura 2.10.** Diagrama esquemático del proceso de OI.

### **2.9.1. Principales componentes de la OI**

Según la explicación de (Moreno B., 2011) cita que los componentes principales de la OI son los siguientes:

- Membrana Semi-permeable
- Tubos de Presión conteniendo la membrana
- Bomba generadora de presión
- Válvulas reguladoras de control
- Contenedores del permeado

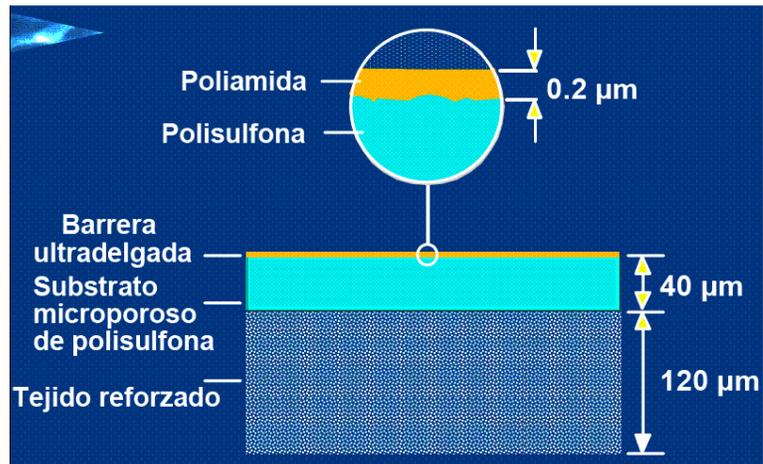
### **2.9.2. Tipos de membrana y materiales**

Los procesos de tratamiento de agua emplean varios tipos de membranas. Ellos incluyen la microfiltración (MF), ultrafiltración (UF), la ósmosis inversa (OI) y nanofiltración (NF).

Membranas de MF tienen el mayor tamaño de los poros y por lo general rechazan las partículas grandes y diversos microorganismos. Membranas de UF tienen poros más pequeños que las membranas de MF y, por lo tanto, además de las partículas grandes y microorganismos, que pueden rechazar las bacterias y macromoléculas solubles, tales como proteínas. Las membranas de OI son efectivamente no porosas y, por tanto, excluyen partículas e incluso muchas especies de bajo peso molecular, tales como iones de sal, productos orgánicos, entre otros, las membranas de NF son relativamente nuevas y a veces se llaman membranas de ósmosis inversa "suelos" (Sagle y Freeman, 2005).

De las cuales numerosas membranas de polímero se han desarrollado para la ósmosis inversa y aplicaciones de ultrafiltración. Los materiales de membrana se extienden de polisulfona y polietersulfona, de acetato de celulosa y diacetato

de celulosa. Membranas compuestas de poliamida están disponibles en el mercado para la desalinización del agua de mar (**Figura 2.11**), por ejemplo, se dispone de una variedad de empresas en los EE.UU., Europa y Japón (Goosen *et al.*, 2004).



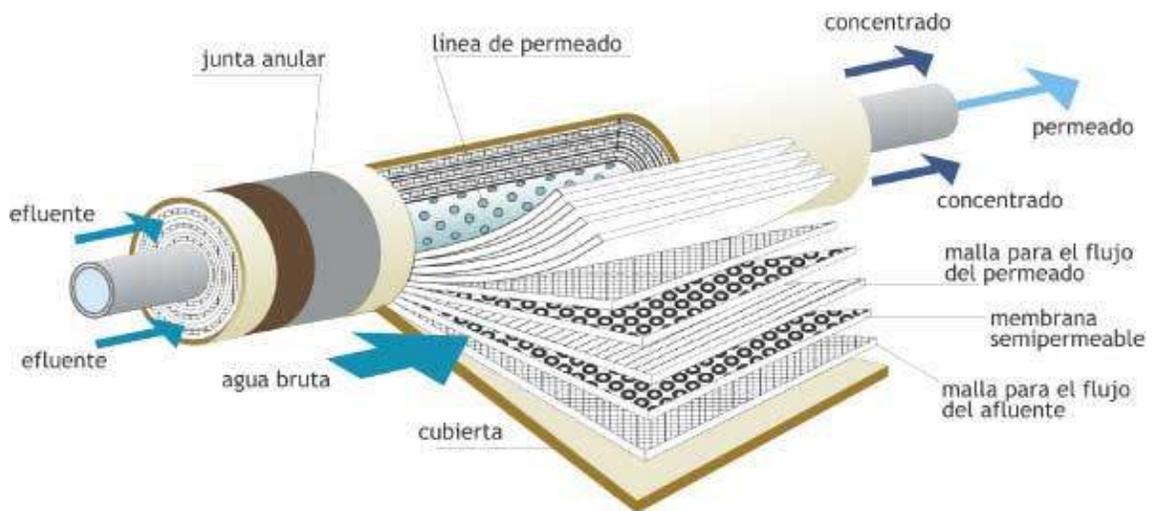
**Figura 2.11.** Sección esquemática de una membrana FILMTEC®.

### 2.9.3. Características de la membrana

Las membranas son películas microporosas con puntuaciones específicas de los poros, que separan selectivamente un fluido a partir de sus componentes (Igunnu y Chen, 2013). La membrana debe ser de bajo costo, contar con una vida más larga y estable y debe fabricarse fácilmente con un buen rechazo de sal es decir, ligeramente permeable a la sal. Deben tener alto flujo de agua es decir, altamente permeable al agua y menos susceptibles a la suciedad. Ellas deben permitir el flujo de grandes cantidades de agua a través de la membrana en relación con el volumen que ocupan. La membrana debe ser química, física y térmicamente estables en aguas saladas. Tienen que ser lo suficientemente fuertes como para soportar altas presiones y calidad del agua de alimentación variable (Garud *et al.*, 2011).

#### 2.9.4. Configuración de membranas

Las membranas de OI se configuran en elementos enrollados en espiral (**Figura 2.12**) que operan a presiones que oscilan desde 600 hasta 1,800 kPa a un flujo promedio de 16-20 L m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> y la recuperación de 70-85%, dependiendo de la concentración de sólidos disueltos totales (Abdul-Hamid, 2011).



**Figura 2.12.** Membrana de Ósmosis Inversa.

#### 2.9.5. Recuperación de sulfato de amonio por OI

La recuperación / utilización de sulfato de amonio es importante tanto desde el punto de vista del medio ambiente y la economía. Una de las técnicas que se pueden emplear es la ósmosis inversa (OI). Las soluciones muy diluidas de (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> pueden ser concentradas por ósmosis inversa para obtener más concentración en el rechazo del sistema (Sarangi *et al.*, 2004).

## **2.9.6. Sistemas de bombeo**

Un sistema de bombeo consiste en el conjunto de elementos que permiten el transporte a través de tuberías y el almacenamiento temporal de los fluidos, de forma que se cumplan las especificaciones de caudal y presión necesarias en los diferentes sistemas y procesos (Blanco-Marigorta *et al.*, 1994). En sí son utilizados para aumentar la carga hidráulica del agua. Los principales tipos de bombas son centrífugas y de desplazamiento. Las bombas centrífugas tienen un elemento giratorio (impulsor) que imparte energía al agua. Las bombas de desplazamiento son a menudo del tipo movimiento alternativo, en el que un pistón lleva el agua hacia una cámara cerrada y luego expulsa bajo presión (Viessman *et al.*, 2009).

### **2.9.6.1. Carga Dinámica Total (CDT)**

El cálculo de la carga total de bombeo consiste en determinar la energía requerida para impulsar el líquido desde el nivel de succión hasta el nivel de descarga, venciendo la resistencia que ofrece la tubería y los accesorios, al paso del fluido (CONAGUA, 2007).

El primer paso en la selección de bombas es determinar las características de funcionamiento de los sistemas en los que se van a utilizar. Una característica importante es la carga dinámica total (CDT) contra el cual la bomba debe funcionar (Viessman *et al.*, 2009). La CDT de bombeo se define como la suma total de resistencias del sistema, correspondientes a la carga estática total, a la pérdida de carga de fricción en la tubería de succión y descarga y a la velocidad (CONAGUA, 2007).

$$CDT = H_e + H_f + H_v$$

Donde:

$H_e$  = carga estática

$H_f$  = pérdida total por fricción

$H_v$  = velocidad de la altura

## 2.10. Consideraciones de la Ósmosis Inversa

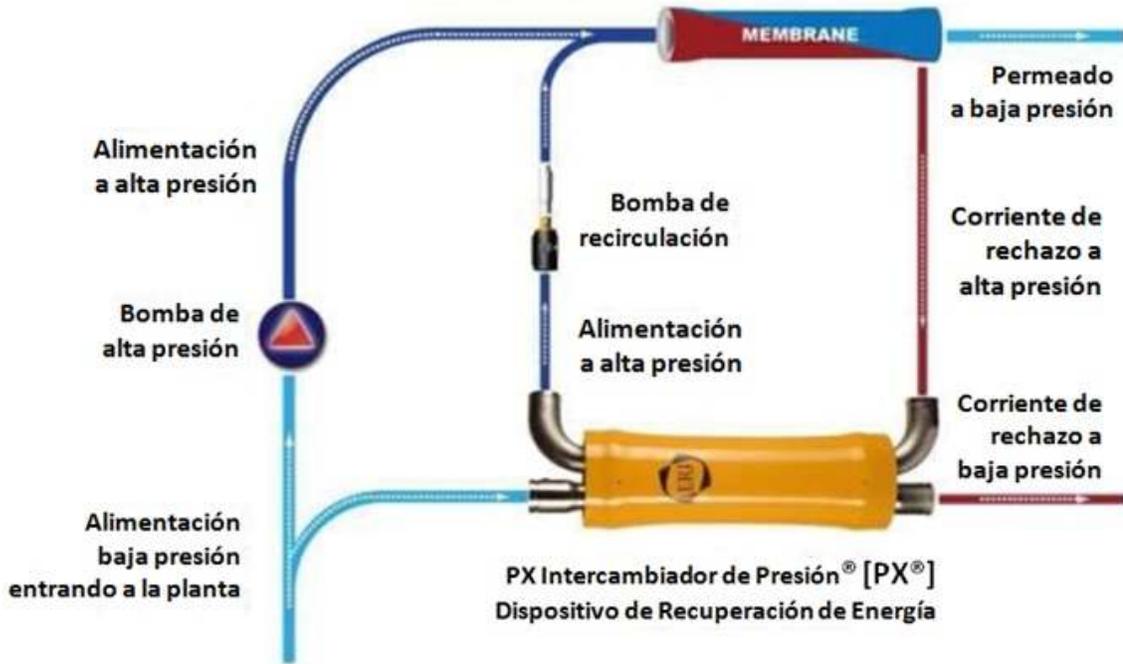
Esta tecnología tiene la ventaja de un proceso de membrana basada en que se alcanza la concentración y separación sin un cambio de estado y sin uso de productos químicos o energía térmica, haciendo así que la energía del proceso sea eficiente e ideal para las aplicaciones de recuperación (Garud *et al.*, 2011) y ocupan menos espacio (Pérez *et al.*, 2010). Otras ventajas del proceso de OI que la hacen especialmente atractiva para el tratamiento de agua incluye:

1. Los sistemas de OI son fáciles de diseñar y operar, tienen bajos requerimientos de mantenimiento, y son de tipo modular, por lo que la expansión de los sistemas es sencillo.
2. Los contaminantes tanto orgánicos como inorgánicos se pueden eliminar de forma simultánea por los procesos de membranas de ósmosis inversa.
3. Los sistemas de OI permiten su recuperación / reciclado del proceso de los flujos de residuos sin ningún efecto sobre el material que se está recuperando.
4. Los sistemas de membranas de ósmosis inversa a menudo requieren menos energía y ofrecen reducción en capital y costos de operación que muchos sistemas de tratamiento convencionales, y
5. Los procesos de OI pueden reducir considerablemente el volumen de los flujos de residuos para que estos puedan ser tratados de manera más eficiente y rentable por otros procesos como la incineración.

Los sistemas de OI pueden reemplazar o ser usado en conjunto con otros procesos de tratamiento tales como la oxidación, adsorción, extracción, o el tratamiento biológico (así como muchos otros) (Williams, 2003) debido a que el tratamiento de OI proporciona agua con una muy alta calidad para su reutilización (Pérez *et al.*, 2010).

Además, el uso de los sistemas de recuperación de energía en los últimos años, como la rueda Pelton, turbocompresor e intercambiador de presión

(Figura 2.13), han reducido en gran medida los costos de consumo de energía y operación, por lo que la tecnología de OI es más competitiva (Kang y Cao, 2012).



**Figura 2.13.** Función de Intercambiador de presión marca ERI.

Las desventajas de este proceso incluyen:

1. Requisito de presión alta para contrarrestar la presión osmótica del sistema.
2. Puede ocurrir ensuciamiento de membrana sino se opera correctamente (Mapiour *et al.*, 2007).

### 2.10.1. Efecto de la temperatura en el flujo de alimentación

La temperatura de alimentación tiene un gran impacto en el flujo de permeado; es decir, aumenta el flujo de permeado. Esto se atribuye al efecto de la temperatura del agua de alimentación. A medida que esta temperatura

aumenta, por un lado, esto disminuirá la presión de conducción neta debido a un aumento en la presión osmótica y, por otro lado, dará lugar a aumento en el coeficiente de permeabilidad al agua debido a la disminución en tanto la viscosidad y la densidad. Es decir, aumenta el paso de sales en el permeado (Shamel y Chung, 2006).

### **2.10.2. Ensuciamiento de membrana**

Un gran desafío para la aplicación generalizada de la tecnología de OI es el ensuciamiento de la membrana (Kang y Cao, 2012), que se define operacionalmente como la reducción en el transporte de agua por unidad de área de membrana (de flujo), causado por una sustancia o sustancias en el agua de alimentación que se acumulan ya sea sobre o en la membrana (Paul y Abanmy, 1990).

El ensuciamiento es causado esencialmente por la deposición de suciedades tales como orgánicos, minerales, coloides, la biomasa y las partículas sobre la superficie de la membrana (Lee *et al.*, 2003). Las características de ensuciamiento y el comportamiento sobre las superficies de la membrana pueden ser determinadas por las características del agua de alimentación (por ejemplo, pH y fuerza iónica, concentración de los componentes clave), propiedades de la membrana (por ejemplo, ángulo de contacto, de carga superficial, rugosidad y corte de peso molecular), las condiciones de funcionamiento (por ejemplo, flujo de permeado y la tasa de recuperación), y procedimientos de pretratamiento (Chon *et al.*, 2012).

La experiencia de las plantas de tratamiento de agua por membrana ha demostrado que los parámetros clave de diseño se deben seguir para evitar el rápido ensuciamiento de la membrana (Abdul-Hamid, 2011). Aun así, el costo del proceso puede ser compensado por la calidad del agua obtenida y la oportunidad que se tiene para el reúso de la misma (Muro *et al.*, 2009).

### 2.10.3. Limpieza de membrana

Las membranas de OI y UF son ampliamente utilizadas para la eliminación de impurezas, la concentración y la recuperación de sustancias valiosas, entre otros. (Shinjuku-ku, 1999), por tal motivo se ven obstaculizadas por el fenómeno de ensuciamiento (Seng *et al.*, 2011). De tal forma que la limpieza y desinfección de membranas de ósmosis inversa es de extrema importancia para su uso en muchas aplicaciones industriales (Naaktgeboren *et al.*, 1988).

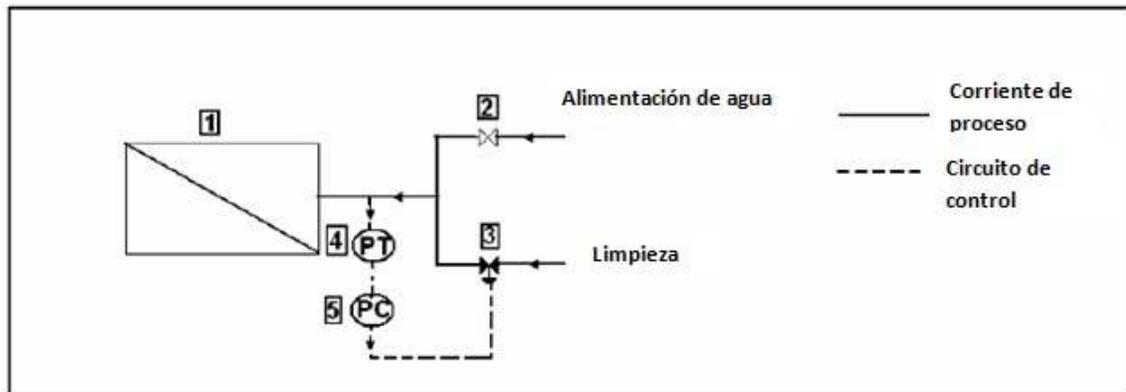
Se muestra que la adición de NaOH (sosa caustica o hidróxido de sodio) puede mejorar el rendimiento general de limpieza cuando se introduce con otros agentes químicos, debido a su capacidad para aflojar la capa de suciedad (Seng *et al.*, 2011). Los siguientes productos químicos se utilizan como agentes de limpieza para membranas de OI y UF:

- Ácidos: ácido cítrico, ácido oxálico, ácido sulfámico, ácido clorhídrico, etc.
- Alcalis; hidróxido de sodio (NaOH), carbonato de sodio, fosfato de sodio, silicato de sodio, borato de sodio, etc.
- Surfactantes
- Agentes oxidantes
- Agentes reductores
- Dispersantes basados en polímeros
- Enzimas
- Disolventes orgánicos

Un agente adecuado o una formulación adecuada de esos agentes deben ser seleccionados para la limpieza de la membrana de acuerdo con las propiedades y la resistencia química de una membrana, la cantidad y la composición de las incrustaciones, etc. (Shinjuku-ku, 1999).

De esta forma se monitoriza la presión de entrada en una unidad de OI. Si la presión de entrada se incrementa en un 10% de su valor nominal de funcionamiento a continuación se abre la válvula de limpieza. La limpieza se

realiza in situ (en sitio). La siguiente figura (**Figura 2.14**) muestra el control de procesos para la limpieza de la membrana (Mapiour *et al.*, 2007). Como el método de limpieza varía con la estructura del sistema, composición de la membrana y así sucesivamente, la limpieza se lleva a cabo de acuerdo con el manual de instrucciones del proveedor (Shinjuku-ku, 1999).



(1) Unidad de OI; (2) Válvula de compuerta de OI; (3) Válvula globo para limpieza; (4) Transmisión de presión; (5) Controlador.

**Figura 2.14.** El control del proceso para la limpieza de la membrana.

### 2.10.5. Parámetros fisicoquímicos

La calidad de diferentes tipos de agua se ha valorado a partir de variables físicas, químicas y biológicas, evaluadas individualmente o en forma grupal.

Los parámetros fisicoquímicos dan una información extensa de la naturaleza de las especies químicas del agua y sus propiedades físicas. En la mayoría de los casos las variables más empleadas para la valoración fisicoquímica del agua a partir de indicadores son el pH, una especie como nitrógeno como nitratos, amonio, fosfato total, SST, DBO y DQO. Sin embargo en implementaciones de diversas tecnologías la consideración de parámetros puede ser mayor de acuerdo a la valoración, como, conductividad, dureza, alcalinidad, temperatura, SDT, turbidez (Samboni-Ruiz *et al.*, 2007).

### **2.10.6. Costos de capital de los sistemas de membrana**

Los costos de capital de los sistemas de membrana de ósmosis inversa varían en función del tamaño de rechazo requerido, materiales de construcción y ubicación del sitio. Los costos de operación dependen de los precios de la energía y el nivel total de sólidos disueltos (SDT) en el agua de alimentación. Las membranas de ósmosis inversa tienen generalmente una esperanza de vida de 3-7 años (Igunnu y Chen, 2013).

Un estudio de Escalante *et al.* (2003) proporcionó datos comparativos sobre el costo del agua potable y el agua tratada en México: el metro cúbico de agua tratada dependiendo de su calidad, varía de 1.48 a 5.00 pesos, mientras que la tarifa de agua potable de acuerdo al CNA (2003), variaba de 4 a 14.00 pesos por metro cúbico, este comparativo muestra indicios de la factibilidad económica que puede tener el tratamiento del agua para destinarla en diferentes aplicaciones (Muro *et al.*, 2009).

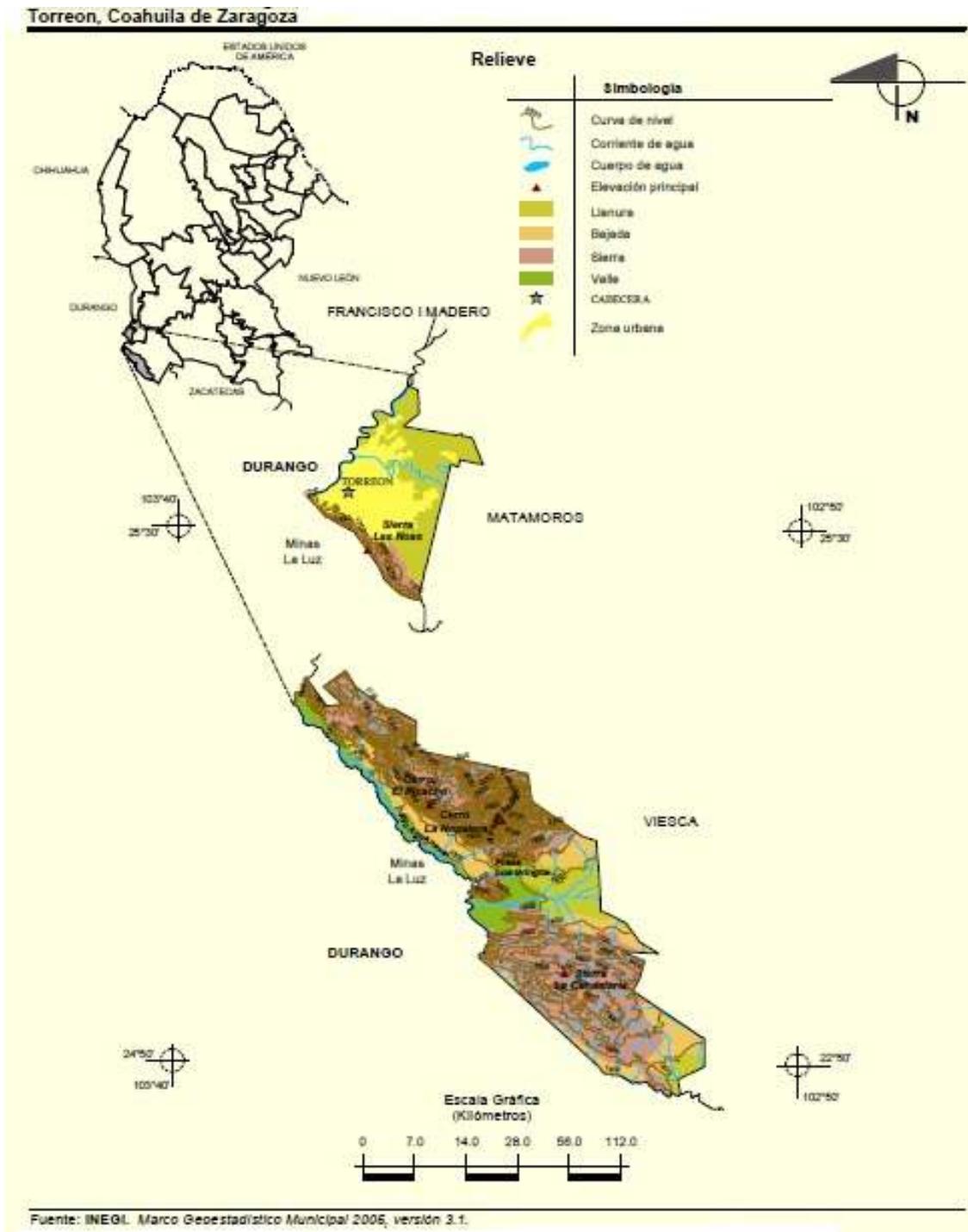
### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

En este punto se enumeran los análisis, instrumentos técnicos, software y metodología para elaborar el diseño de la planta tratadora de agua salobre para éste proyecto:

- Análisis químico del agua proporcionado por Peñoles
- Microsoft Office
- Software AutoCAD
- Software ROSA de Dow Water & Process Solutions versión 9.1
- Software Pipe Flow Expert
- Curvas de eficiencia y software de selección de sistemas de bombeo
- Calculadora científica
- Criterios de diseño de la empresa Industrias Islas S.A. de C.V.

#### 3.1. Área general

El proyecto de Ósmosis Inversa se diseñó para la planta MMP Suavización II de la empresa Met-Mex Peñoles S.A. de C.V. en la ciudad de Torreón, Coahuila, México. Éste municipio cuenta con un territorio de 1,255.98 km<sup>2</sup> (**Figura 3.1**) y se localiza entre los paralelos 25° 42' y 24° 48' de latitud norte; los meridianos 103° 31' y 102° 58' de longitud oeste; altitud entre 1,000 y 2,500 m. El municipio cuenta con un clima muy seco semicálido (89%) y seco templado (11%) (Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, 2009). El cual cuenta con una precipitación anual promedio de 251.4 mm (Servicio Meteorológico Nacional, 2014).



**Figura 3.1.** Ubicación geográfica del municipio Torreón, Coah.

### **3.2. Localización del sitio de investigación**

La investigación se llevó a cabo en el Departamento de Diseño de Procesos de la empresa Industrias Islas S.A. de C.V., situada en el municipio de Santa Catarina, Nuevo León, ubicada en Camino a Villa de García Km. 4.2.

### **3.3. Análisis fisicoquímico del agua y otros parámetros**

Es un proceso básico conocer la calidad del agua a tratar y la única forma de conocerla es mediante un estudio fisicoquímico y bacteriológico del agua (**Tabla 3.1**), dicho estudio solo puede ser realizado por laboratorios especializados y equipados con la mejor tecnología que logren encontrar las cantidades exactas de los elementos y microorganismos contenidos en el agua. En éste caso solo es necesario el análisis fisicoquímico puesto que el agua no será destinada para consumo humano. Industrias Peñoles fue responsable de entregarlo.

- Se obtuvo y evaluó el análisis fisicoquímico del agua que se desea tratar para determinar las condiciones de operación de la futura planta.
- De los resultados del análisis se obtienen los datos expresados como iones ó como  $\text{CaCO}_3$ , SDT, entre otros minerales necesarios para introducir al diseño, también se toma en cuenta la temperatura del fluido y su pH.

**Tabla 3.1.** Calidad en el agua bruta.

Nombre	Producto (ppm)
NH <sub>4</sub>	0.00
K	0.00
Na	4000.00
Mg	50.00
Ca	60.12
Sr	0.00
Ba	0.00
CO <sub>3</sub>	0.00
HCO <sub>3</sub>	0.00
NO <sub>3</sub>	0.00
Cl	2385.00
F	0.00
SO <sub>4</sub>	5500.00
SiO <sub>2</sub>	60.00
Boro	0.00
CO <sub>2</sub>	0.00
SDT	12055.14
pH	8.00

### 3.4. Levantamiento de campo

Una vez que se cuenta con el análisis físico-químico del agua es necesario también recopilar información con una visita de campo en Industrias Peñoles para ver las principales variables que posteriormente se tomarán en cuenta para elaborar el diseño del módulo de Ósmosis, las cuales son:

- Suministro del agua bruta.- Localizar la fuente de alimentación al sistema de OI dentro de nuestro alcance.
- Capacidad total del agua producto.- Determinar el caudal de agua producto requerida por el cliente, sobre de este dato se obtendrá la cantidad de agua de alimentación al módulo dentro de la etapa de diseño utilizando como parámetro principal el porcentaje de recuperación de la planta.

- Calidad del agua producto.- Especificación de la tolerancia de calidad de agua por parte del cliente (Industrias Peñoles) en mg/l ó en ppm, necesaria para su consumo.
- Uso final del agua.- Conocer el destino del agua tratada para realizar consideraciones sobre el tipo de membrana a utilizar para aplicar en el proceso y mejorar aún más la calidad del agua.
- Localización de la planta.- Determinar el espacio físico donde se instalará la planta para realizar consideraciones acerca del mantenimiento, protección a la planta y trazos en tubería para localizar fuentes y destinos del agua, distancias para calcular la Carga Dinámica Total (CDT) para la selección del equipo de bombeo.



**Figura 3.2.** Vista aérea del área de Met-Met Peñoles.

### **3.5. Evaluación de los antecedentes del proyecto**

El presente proyecto surge de la necesidad de la empresa Met-Mex Peñoles, S.A de C.V. de tener la infraestructura necesaria para producir 700 m<sup>3</sup>/día de

agua desmineralizada para alimentar a la caldera del cliente con una conductividad menor a 150  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (75 ppm de SDT), Sílice menor a 0.9 ppm y dureza total de 0.3 ppm  $\text{CaCO}_3$ .

El agua de alimentación será agua industrial tratada de la planta de MMP Suavización II. Se consideró para el diseño una calidad de alimentación de 12,072.52 ppm SDT, 60.0 ppm  $\text{SiO}_2$  y dureza total de 60.12 ppm. Se consideró una turbidez del agua de alimentación de <20 NTU.

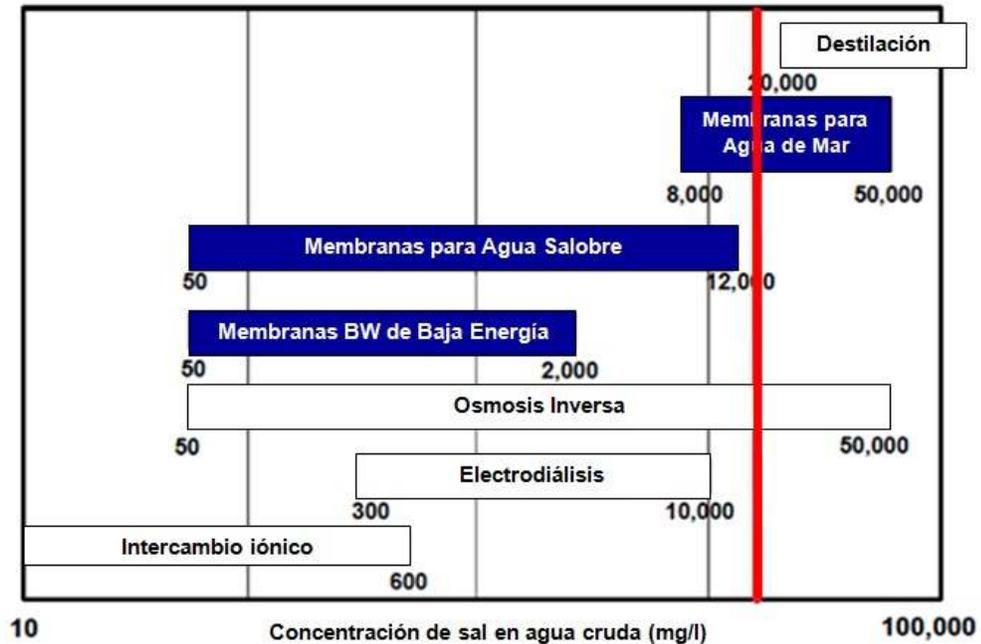
Considerando que el agua de alimentación puede tener una calidad variable, se propone un sistema de clarificación y filtración de medios como pre-tratamiento para garantizar de esta manera una calidad de agua de alimentación constante al módulo de ósmosis inversa.

Se plantea que la planta de ósmosis inversa cuente con su filtro pulidor de cartuchos, bombas dosificadoras de químicos, bomba de alta presión, instrumentación, tubería de interconexión y está diseñada para la operación automática local mediante un controlador. Además que la planta y su equipo de limpieza sean de operación automática.

### **3.6. Criterios de diseño**

La necesidad del proceso es de reducir el nivel de sólidos disueltos totales (SDT), para ello se revisan las diferentes alternativas de desmineralización y se seleccionaron los posibles procesos para desmineralizar.

A continuación en la siguiente tabla se muestran los diferentes procesos viables para desmineralizar a diferentes concentraciones de sólidos disueltos.



**Figura 3.3.** Guía de selección de tecnología de tratamiento por concentración de SDT.

Para el tratamiento del efluente que se encuentra en el tanque balance 3 (Agua suavizada), se someterá a un sistema en donde se considera la desmineralización por Ósmosis Inversa.

Para los criterios de diseño de Ósmosis Inversa se utilizaron valores de los manuales técnicos y fichas técnicas de DOW Water and Process Solution.

Se seleccionó la membrana SW30HRLE-400 de DOW ya que es una membrana de nueva generación, ofrece una alta productividad, permitiendo un menor costo al desmineralizar el agua.

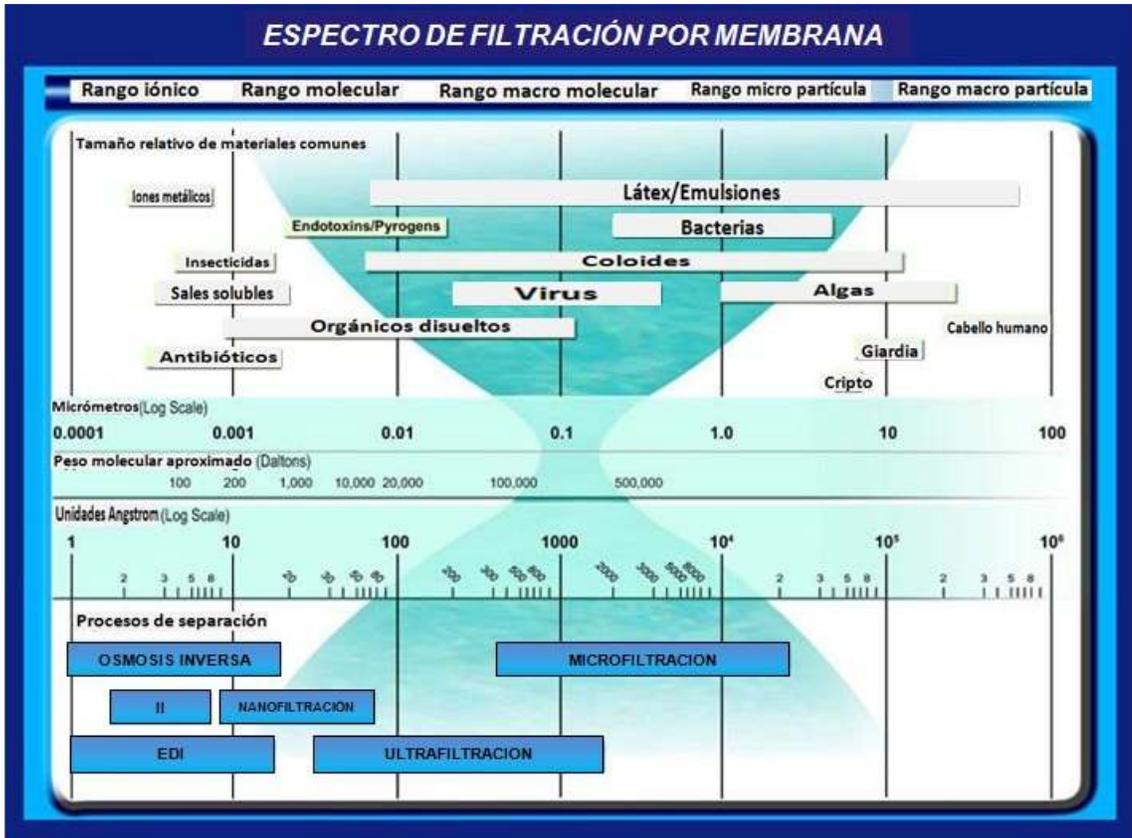


Figura 3.4. Espectro de filtración por membrana.

Tabla 3.2. Criterios de diseño de Ósmosis Inversa.

Criterios de diseño de Ósmosis Inversa	
Descripción	Valor
*Flux de diseño para SDI <3; Agua Superficial	22-29 L/m <sup>2</sup> -hr
*Flux de diseño para SDI <1; Permeado OI	36-43 L/m <sup>2</sup> -hr
Máximo COT (Carbón Orgánico Total; mg/L)	3
Máximo de Grasas y Aceites (mg/L)	0.1
Máximo Cloro Libre (mg/L)	0.1

### 3.7. Diseño de Módulo de Ósmosis Inversa

El diseño del módulo de OI se inició con la aplicación del software ROSA (Reverse Osmosis System Analysis) de la marca Filmtec de Estados Unidos, el software desarrolla todos los cálculos necesarios a partir de los valores obtenidos en el análisis físico-químico del agua. Donde se tienen como objetivos en el diseño:

1. Obtener el arreglo óptimo del número de membranas.
2. La cantidad de recipientes de presión.
3. Flujo de alimentación.
4. Y presiones de operación.

En éste sistema se tomó como referencia el modelo de membrana **SW30HRLE-400** de la marca Filmtec de 8 pulgadas de diámetro especial para agua salada (**Anexo A.4.**) para iniciar con la configuración del sistema basándonos también en los criterios de diseño visto anteriormente.

Ecuaciones empleadas para el cálculo de la Ósmosis Inversa:

$$\text{Flujo de agua producto} = \text{Flujo de alimentación} * \text{Porcentaje de recuperación}$$

$$\text{Flujo de agua rechazo} = \text{Flujo de alimentación} - \text{Flujo de agua producto}$$

$$\text{Flujo de diseño} = \frac{\text{Flujo de agua producto}}{\sum \text{Membranas etapa} \times \text{área de membrana}}$$

### 3.7.1. Proyección de la simulación en el software ROSA.

Una vez que todos los datos han sido introducidos en el software, como los resultados del análisis fisicoquímico del agua y temperatura del flujo, se procedió a seleccionar la herramienta necesaria en el software en el cual se realizaron diversas interacciones a partir de la selección de la membrana anteriormente mencionada para hacer la proyección de la simulación.

Siempre es necesario por recomendación del manual de usuario del mismo, recurrir a la parte inferior del análisis y observar si no existe alguna advertencia; de no existir algún tipo de advertencia al momento de correr el programa, se continuó iterando para encontrar el arreglo óptimo con la membrana.

Al ver una proyección satisfactoria para el programa y no presentar alguna advertencia, se realizó la impresión de los resultados en los que observaremos los valores de flujo, conductividad, presión osmótica, presiones de alimentación recomendadas; además de las cantidades de membranas, recipientes y pasos para el diseño del módulo.

Una vez de la proyección del diseño en el software y que se obtuvo se obtuvo el arreglo óptimo se procederá a comprobar la memoria de cálculo con la elaboración del balance de materia y de la selección de los equipos de pretratamiento y listado de los demás equipos complementarios al sistema. Para mayor información de la manipulación del software ver el manual del usuario (**Anexo A.9.**)

### 3.8. Balance de materia

Para realizar el balance de materia del sistema se emplearon las siguientes ecuaciones para el cálculo de la Ósmosis Inversa (**Figura 3.5**):

$$Q_a = Q_p + Q_c$$

$$Q_a C_a = Q_p C_p + Q_c C_c$$

Dónde:

$Q_a$  = Flujo de alimentación, gal/min

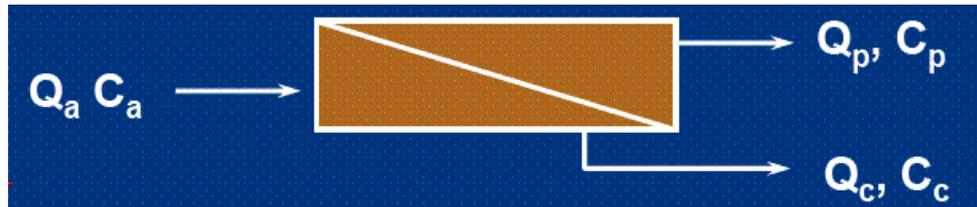
$Q_p$  = Flujo de permeado, gal/min

$Q_c$  = Flujo de concentrado, gal/min

$C_a$  = Concentración de soluto en alimentación, lb/gal

$C_p$  = Concentración de soluto en permeado, lb/gal

$C_c$  = Concentración de soluto en el rechazo, lb/gal



**Figura 3.5.** Balance de masa OI.

### 3.9. Pretratamiento

Como ya se había comentado anteriormente, el flujo de los efluentes de las plantas de ácido sulfúrico y sulfato de amonio tienen un pretratamiento previo a cargo de Industrias Peñoles, el cual pasa a través de sus sistemas de neutralización y clarificación, una vez que se almacene en el tanque balance 3, posteriormente se conducirá a un sistema de filtración ya existente con límite de batería de MMP entregando una calidad más óptima al sistema de Ósmosis Inversa para evitar el ensuciamiento de las membranas.

Se realizaron unas Memorias de Cálculo con el objetivo demostrar en ellas los cálculos realizados los cuales están disponibles en otro capítulo posteriormente.

Dentro del alcance en éste diseño se consideró los siguientes pretratamientos:

### **3.9.1 Filtros pulidores**

Se consideran en el diseño cartuchos de Polipropileno Extruido que remueven partículas en promedio mayores a 5 y 1 micra. Los filtros de cartucho protegen a la bomba de alta presión contra cualquier partícula abrasiva proveniente de la línea que pueda ocasionar daños a los impulsores y a las membranas dado que se puede presentar el taponamiento u obstrucción de los canales hidráulicos. La revisión y cambio de los filtros se hace mediante la lectura de manómetros en la alimentación y descarga de los filtros y sus válvulas de corte.

### **3.9.2. Dosificación de químicos acondicionantes**

Después del pretratamiento convencional se inicia con la dosificación de químicos para el acondicionamiento del agua con límite de batería de IISA, y con ello lograr que las membranas operen en óptimas condiciones.

El agua de alimentación se acondiciona con los químicos adecuados para controlar la concentración de sales y evitar el ensuciamiento de membranas. Esto se logra mediante la dosificación de inhibidor de incrustaciones y ácido sulfúrico, que ayudan a que las sales de baja solubilidad no precipiten cuando alcancen la concentración mayor que se presenta en el rechazo de la última membrana en la ósmosis inversa.

Las incrustaciones más comunes son causadas por sales de Carbonatos, Sulfatos y Fluoruros de calcio. La dosificación de estos productos se ajusta en función de la concentración de sales en el agua de alimentación y de la recuperación del sistema de osmosis inversa. Para ello se realizó un análisis de incrustación en software especializado. Se recuerda que el producto debe ser aprobado por FILMTEC. El diseño sugiere una dosificación de 3 ppm de inhibidor y 100 ppm de ácido sulfúrico.

También se contempló en el diseño el ajuste de pH en el agua de alimentación es importante para garantizar un índice de Langelier (**Tabla 3.3**) en el agua de rechazo, menor a 2; es decir, mantener el pH en el lado corrosivo (bajo) y evitar incrustaciones por carbonato de calcio en las membranas por cuestiones de criterio de diseño de IISA.

**Tabla 3.3.** Índice de Langelier.

Concepto	Descripción
<b>Langelier&lt;0</b>	Si el índice es negativo: indica que el agua es corrosiva.
<b>Langelier =0</b>	Si el índice es 0: el agua está perfectamente equilibrada.
<b>Langelier&gt;0</b>	Si el índice es positivo: indica que el agua es incrustante.

### 3.10. Selección y dimensionamiento del equipo de bombeo

Se seleccionaron las bombas de baja y de alta presión, mediante el uso de las curvas de operación de las marcas recomendadas por IISA para la bomba de baja presión y de las recomendaciones establecidas en el software ROSA para la selección de la bomba de alta presión.

Para la selección y dimensionamiento de las bombas es necesario tener el flujo total y calcular la carga dinámica total (CDT) que deben superar las bombas, para esto se necesitó conocer las presiones de cada uno de los elementos involucrados en la transferencia de agua y para ello se realizaron los cálculos necesarios en el software Pipe Flow Expert para obtener la CDT y enseguida hacer la selección del sistema de bombeo con la ayuda de las curvas de bombas del fabricante.

### **3.11. Elaboración de Diagramas de Flujo de Proceso**

Se realizaron los Diagramas de Flujo del sistema general en el software AutoCAD y PowerPoint para obtener la descripción de la lógica del proceso en forma esquemática para su interpretación. Uno de ellos para puntualizar cada etapa del balance de materia y el segundo para la descripción detallada de equipos principales y líneas en el proceso con códigos de identificación.

### **3.12. Listado de selección de equipos**

Una vez terminado todo el diseño del sistema y cálculos, se concluye el proyecto con la elaboración del listado general de equipos en el programa Microsoft Office Excel, donde se describen las características y cantidad de cada uno de ellos, agrupándolo por etapa de pretratamiento, equipo de bombeo y sistema de OI.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Resultados de proyección de simulación software ROSA

En muchos casos, los procesos de membrana son más rápidos, más eficientes y más económicos que las técnicas de separación convencionales. Con la membrana, la separación es por lo general a temperatura ambiente, permitiendo de este modo soluciones sensibles a la temperatura a ser tratados sin los constituyentes siendo dañados o modificados químicamente (Avinash, 2012). De acuerdo a lo anterior, el flujo de alimentación al sistema es a la temperatura ambiente en la zona, 29°C, proporcionando una mayor seguridad en el proceso al no tener que modificar la temperatura del efluente.

**Tabla 4.1.** Detalles del Sistema.

Detalles del sistema		
Flujo de alimentación a etapa 1 185 gpm	Etapa 1 Flujo permeado 129.5 gpm	Presión osmótica:
Agua cruda al sistema 185 gpm	Etapa 1 Recuperación 70 %	Alimentación 94.7 psig
Presión de alimentación 351.39 psig	Temperatura del flujo 29 C	Concentrado 311.31 psig
Factor de flujo 1	SDT en Alimentación 12072.52 mg/l	Promedio 203 psig
Dosis química (100% H2SO4) 0.05	Número de elementos 48	Promedio NPD 172.74 psig
Área total activa 19200 ft <sup>2</sup>	Promedio de flujo etapa 1 9.71 gfd	Potencia 39.4 kW
Clasificación de las Aguas: Efluente Terciario (microfiltración) SDI < 3		Energía específica 5.07 kWh/kgal

**Tabla 4.2.** Corrientes.

Corrientes (ml/l como Ion)									
Nombre	Alimentación	Ajuste en Alimentación	Concentrado			Permeado			
			Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Total
NH <sub>4</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	4000.00	4017.35	6664.34	9474.00	13352.80	8.45	21.93	33.79	16.36
Mg	50.00	<b>50.00</b>	83.00	118.09	166.57	0.02	0.05	0.08	<b>0.04</b>
Ca	60.12	<b>60.12</b>	99.80	141.99	200.29	0.02	0.06	0.09	<b>0.05</b>
Sr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO <sub>3</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
HCO <sub>3</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NO <sub>3</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cl	2385.00	2385.00	3953.05	5613.94	7903.82	10.17	26.50	40.83	19.74
F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SO <sub>4</sub>	5500.00	5500.05	9128.96	12986.06	18315.29	4.03	10.26	15.81	7.70
SiO <sub>2</sub>	60.00	<b>60.00</b>	99.34	140.90	198.10	0.42	1.09	1.67	<b>0.81</b>
Boro	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO <sub>2</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SDT	12055.14	<b>12072.52</b>	20028.49	28474.97	40136.88	23.11	59.89	92.28	<b>44.70</b>
pH	8.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00

En la siguiente **Tabla 4.3** de Excel con fórmulas se verificó la dureza total de CaCO<sub>3</sub> al introducir en ella los valores resultantes del permeado de Mg y Ca de la

**Tabla 4.2.**

**Tabla 4.3.** Dureza total de CaCO<sub>3</sub>.

	Unidades	Valor
Calcio	mg/l	0.05
Calcio	meq/l	0.00250
Magnesio	mg/l	0.04
Magnesio	meq/l	0.00329

DUREZA	mg/L CaCO <sub>3</sub>	0.290
--------	---------------------------	-------

	Pm	Peq
Calcio	40.08	20.04
Magnesio	24.32	12.16
Carbonato cálcico	100.1	50.05

Peq = Pm/Valencia

Pm = Peso molecular

Pe = Peso equivalente

En la siguiente tabla (**Tabla 4.4**) se demuestra que el diseño de la planta desmineralizadora de agua salobre cumple en cuanto a cantidad y calidad de flujo requerido:

**Tabla 4.4.** Requerimientos de cantidad y calidad de flujo.

Requerido	Obtenido
≥ 700 m <sup>3</sup> /día agua producida	705 m <sup>3</sup> /día agua producida
<75 ppm de SDT	44.70 ppm de SDT
< 0.9 ppm de sílice	0.81 ppm de sílice
< 0.3 ppm de dureza total CaCO <sub>3</sub>	0.29 ppm de dureza total CaCO <sub>3</sub>

$$705\text{m}^3/\text{día} * 365 \text{ días/año} = \mathbf{257,325 \text{ m}^3/\text{año agua tratada}}$$

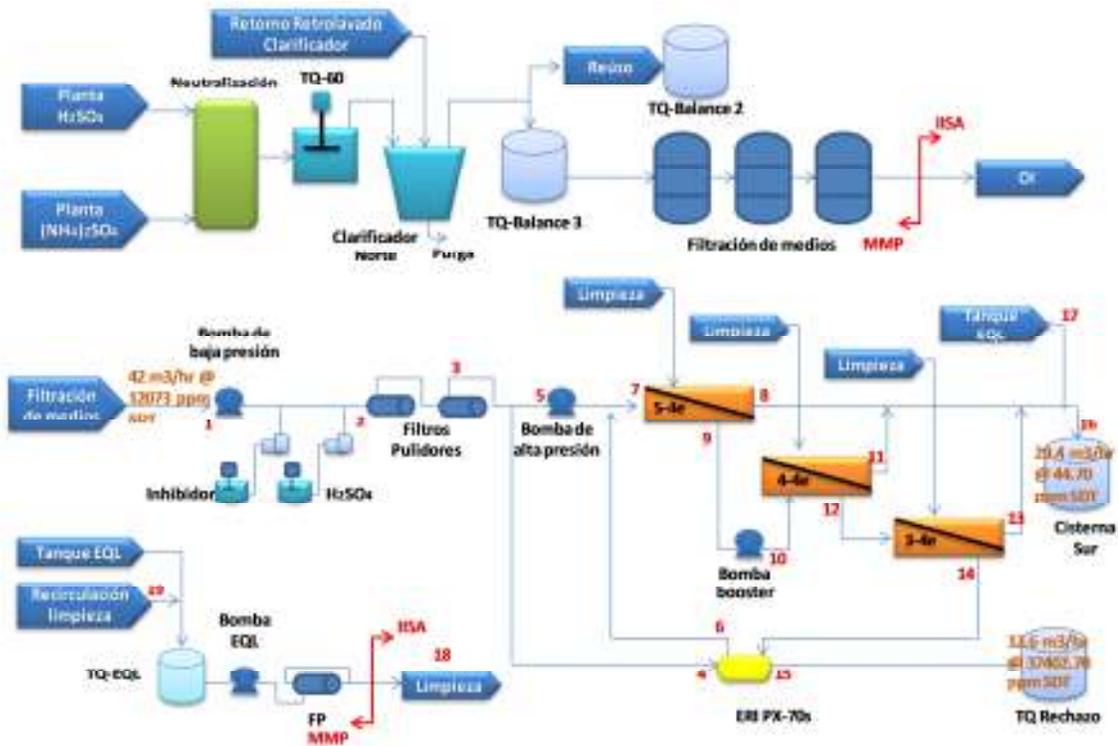
Este resultado se logró gracias a que las membranas de OI son efectivamente no porosas y, por tanto, excluyen partículas e incluso muchas especies de bajo

peso molecular, tales como iones de sal, productos orgánicos, etc. (Sagle y Freeman, 2005).

#### **4.2. Resultados de balance de materia por etapas**

Los balances de materia y energía son una contabilidad de entradas y salidas de materiales de un proceso o de una parte de éste. Estos balances son importantes para el diseño del tamaño de aparatos que se emplean y para calcular su costo (Valiente, 1997). Coincidiendo con la literatura es de suma importancia realizar siempre un balance de materia cuando se trata de un proceso, debido a que éste dará un mapa del dimensionamiento y magnitud de los equipos.

A continuación se muestra las tablas del balance de materia por etapas y un diagrama de flujo en donde llevará la secuencia de acuerdo a las líneas y equipos del proceso con las etapas del balance de materia (**Figura 4.1**):



**Figura 4.1.** Diagrama de Flujo de Proceso con balance de materia de planta desmineralizadora de agua salobre.

**Tabla 4.5.** Parte uno de balance de materia.

	OI				
	Succión de bombas de baja presión a OI	Alimentación FP 1	Salida FP 2	Alimentación del ERI	Alimentación a bombas de alta
Tipo de Fluido	Agua Suavizada	Agua Suavizada	Agua Suavizada	Agua Suavizada	Agua Suavizada
Corriente	1	2	3	4	5
Flujo normal (m3/h)	42.02	42.02	42.02	10.00	32.02
Flujo normal (gpm)	184.99	184.99	184.99	44.03	140.96
Flujo de diseño (m3/h)	46.22	46.22	46.22	11.00	35.22
Flujo de diseño (gpm)	203.49	203.49	203.49	48.43	155.06
SDT (ppm)	12,055	12,073	12,073	12,073	12,073
SST (ppm)	0.50	0.50	0.05	0.05	0.05
pH	8.00	7.00	7.00	7.00	7.00
Temperatura de operación (°C)	29.00	29.00	29.00	29.00	29.00

Tabla 4.6. Parte dos de balance de materia.

	Descarga del ERI	Alimentación Ol Etapa 1	Permeado etapa 1	Rechazo etapa 1	Descarga de Bomba Booster
Tipo de Fluido	Agua Suavizada	Agua Suavizada	Agua de Osmosis Inversa	Agua de Osmosis Rechazo	Agua de Osmosis Rechazo
Corriente	6	7	8	9	10
Flujo normal (m3/h)	10.00	42.02	16.71	25.31	25.31
Flujo normal (gpm)	44.03	184.99	73.57	111.42	111.42
Flujo de diseño (m3/h)	11.00	43.28	18.38	27.84	27.84
Flujo de diseño (gpm)	48.43	190.54	80.93	122.56	122.56
SDT (ppm)	15520	12,893.02	23	20,029.10	20,029.10
SST (ppm)	0.05	0.05	-	0.00	0.00
pH	7.00	7.00	6.00	7.40	7.40
Temperatura de operación (°C)	29.00	29.00	29.00	29.00	29.00

Tabla 4.7. Parte tres de balance de materia.

	Permeado etapa 2	Rechazo etapa 2	Permeado etapa 3	Rechazo etapa 3	Rechazo del ERI	Recuperación 70%
Tipo de Fluido	Agua de Osmosis Inversa	Agua de Osmosis Rechazo	Agua de Osmosis Inversa	Agua de Osmosis Rechazo	Agua de Osmosis Rechazo	Permeado total Agua de Osmosis Inversa
Corriente	11	12	13	14	15	16
Flujo normal (m3/h)	7.52	17.78	5.18	12.60	12.60	29.41
Flujo normal (gpm)	33.12	78.29	22.80	55.50	55.50	129.49
Flujo de diseño (m3/h)	8.28	19.58	5.70	13.87	13.87	32.33
Flujo de diseño (gpm)	36.44	86.12	25.08	61.05	61.05	142.44
SDT (ppm)	60	28,477.10	92	40,137.55	37,402.48	44.70
SST (ppm)	-	0.12	-	0.17	0.17	-
pH	6.00	7.40	6.00	7.40	7.40	6.00
Temperatura de operación (°C)	29.00	29.00	29.00	29.00	29.00	29.00

**Tabla 4.8.** Parte cuatro de balance de materia.

	Llenado TO- Limpieza	Entrada de Limpieza	Retorno de limpieza
Tipo de Fluido	Agua de Osmosis Inversa	Solución de limpieza	Solución de limpieza
Corriente	17	18	19
Flujo normal (m3/h)			
Flujo normal (gpm)	-	-	-
Flujo de diseño (m3/h)	45,35	45,42	45,42
Flujo de diseño (gpm)	142,44	199,98	199,98
SDT (ppm)	44,70	ND	ND
SST (ppm)	0	ND	ND
pH	6,00	1 - 13	1 - 13
Temperatura de operación (°C)	29,00	29,00	29,00

**Tabla 4.9.** Nomenclatura de tablas de balance de materia.

Inputs M.C. Rosa y PX 70s
Con factor de protección 3% ~
Con factor de protección 10%
Resultados finales flujo y SDT
Comparativo output M.O. Rosa
Ajuste ROSA

### 4.3. Pretratamiento y acondicionamiento químico

Se recomienda un intenso pretratamiento previo con el fin de proteger a la membrana (Goosen *et al.*, 2004). El uso de UF en el pretratamiento o la combinación de pretratamientos convencionales con UF sí proporcionaría agua de permeado con calidad alta y constante que resulta tener mayor fiabilidad para el proceso de OI que con un pretratamiento convencional. Sin embargo, el costo de pretratamiento con membrana de UF es mayor que el pretratamiento convencional (Goosen *et al.*, 2004).

La MF y UF pueden servir como un pretratamiento a la desalación, pero no pueden eliminar la sal del agua (Igunnu y Chen, 2013). Por esta razón sólo se consideró pretratamiento convencional a base de coagulación, clarificación, filtración de medios para reducir los SDT; además por alcance de Industrias Islas el de incluir dosificación de químicos y uso de filtros pulidores previo llegando así a la calidad óptima del agua de alimentación al sistema de OI sin que éste sufra repercusiones.

#### 4.3.1. M.C. de dosificación inhibidor de incrustaciones

##### Objetivo

La presente Memoria de Cálculo tiene por objetivo mostrar los cálculos realizados para el dimensionamiento del tanque inhibidor del sistema de Osmosis Inversa, así como la capacidad de la bomba dosificadora inhibidor.

##### Consideraciones

- Para el tanque y para la bomba se considera un factor de protección 2.
- Para el dimensionamiento del tanque se considera un tanque de día.

**Tabla 4.10.** Datos de dosificación de Inhibidor de Incrustaciones.

Producto	Dosis (ppm)	Concentración		Densidad (kg/l) dosis
		Producto	Dosis	
Inhibidor de incrustaciones	3	100%	20%	1.2

*Flujo volumetrico normal = 185 gpm*

$$1 \text{ ppm} = \frac{0.001 \text{ kg}}{\text{m}^3}$$

$$1 \frac{\text{gal}}{\text{min}} = 0.227 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

### **Cálculos**

1. El consumo de inhibidor es igual al flujo volumétrico normal por las ppm entre la concentración del producto:

$$G_{\text{Inhibidor}} = \text{Flujo Normal} * \frac{\text{ppm de inhibidor}}{\text{Concentración del producto}}$$

$$G_{\text{Inhibidor}} = 185 \frac{\text{gal}}{\text{min}} * \frac{0.227 \text{ m}^3/\text{h}}{1 \text{ gal}/\text{min}} * 3 \text{ ppm} \frac{0.001 \text{ kg}/\text{m}^3}{1 \text{ ppm}}$$

$$G_{\text{Inhibidor}} = 0.1259 \text{ kg}/\text{h}$$

2. Capacidad de la bomba dosificadora de Inhibidor de incrustaciones del sistema de Osmosis Inversa:

$$Q_{\text{Inhibidor}} = \frac{\frac{G_{\text{Inhibidor}}}{\rho_{\text{Inhibidor}}}}{\text{Concentración de la dosis}}$$

$$Q_{\text{Inhibidor}} = \frac{\frac{0.1259 \text{ kg}/\text{h}}{1200 \text{ kg}/\text{m}^3}}{0.2}$$

$$Q_{\text{Inhibidor}} = 0.000525 \text{ m}^3/\text{h}$$

Aplicando el factor de 2 como protección, la capacidad de la bomba es:

$$Q_{\text{Inhibidor}} = 0.000525 \frac{m^3}{h} * 2 = 0.00105 m^3/h$$

### 3. Volumen del tanque inhibidor del sistema OI.

Considerando un tanque de día el volumen del tanque es igual al flujo volumétrico por 24 horas.

$$\text{Volumen de tanque} = 0.00105 \frac{m^3}{h} * \frac{24h}{1 \text{ día}} = 0.025 m^3$$

## Resultados

De acuerdo a los cálculos realizados en el punto 4 y considerando un tanque de día se tiene los siguientes resultados.

La capacidad de la bomba dosificadora inhibidor del sistema OI y considerando un factor de protección 2 es de 0.00105 m<sup>3</sup>/h.

El volumen del tanque de día inhibidor del sistema OI que se requiere es de 0.025 m<sup>3</sup>.

## Conclusiones

La capacidad de la bomba dosificadora inhibidor del sistema OI deberá ser de 0.00105 m<sup>3</sup>/h considerando un factor de protección de 2, el volumen del tanque inhibidor 1er paso OI se requiere de 0.025 m<sup>3</sup> para un tanque de día.

### 4.3.2. M.C. de dosificación ácido sulfúrico

#### Objetivo

La presente Memoria de Cálculo tiene por objetivo mostrar los cálculos realizados para el dimensionamiento del tanque ácido sulfúrico del sistema de Osmosis Inversa, así como la capacidad de la bomba dosificadora de ácido sulfúrico.

#### Consideraciones

- Para el tanque y para la bomba se considera un factor de protección 2.
- Para el dimensionamiento del tanque se considera un tanque de día.

**Tabla 4.11.** Datos de dosificación de ácido sulfúrico.

Producto	Dosis (ppm)	Concentración		Densidad (kg/l) dosis
		Producto	Dosis	
Acido Sulfurico	100	98%	100%	1.84

*Flujo volumetrico normal = 185 gpm*

$$1 \text{ ppm} = \frac{0.001 \text{ kg}}{\text{m}^3}$$

$$1 \frac{\text{gal}}{\text{min}} = 0.227 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

#### Cálculos

1. El consumo de ácido sulfúrico es igual al flujo volumétrico normal por las ppm entre la concentración del producto:

$$G_{\text{H}_2\text{SO}_4} = \text{FlujoNormal} * \frac{\text{ppm de acidosulfúrico}}{\text{Concentración del producto}}$$

$$G_{H_2SO_4} = 185 \frac{gal}{min} * \frac{0.227 m^3/h}{1 gal/min} * 100 ppm \frac{0.001 kg/m^3}{1 ppm}$$

$$G_{H_2SO_4} = 4.2 kg/h$$

2. Capacidad de la bomba dosificadora de ácido sulfúrico del sistema de Osmosis Inversa:

Ecuación:

$$Q_{H_2SO_4} = \frac{\frac{G_{\text{ácido sulfúrico}}}{\rho_{\text{ácido sulfúrico}}}}{\text{Concentración de la dosis}}$$

$$Q_{H_2SO_4} = \frac{\frac{4.2 kg/h}{1840 kg/m^3}}{1}$$

$$Q_{H_2SO_4} = 0.002283 m^3/h$$

Aplicando el factor de 2 como protección, la capacidad de la bomba es:

$$Q_{H_2SO_4} = 0.002283 \frac{m^3}{h} * 2 = 0.00465 m^3/h$$

3. Volumen del tanque de ácido sulfúrico 1er paso OI.

Considerando un tanque de día el volumen del tanque es igual al flujo volumétrico por 24 horas:

$$\text{Volumen de tanque} = 0.00465 \frac{m^3}{h} * \frac{24h}{1 \text{ día}} = 0.1095 m^3$$

## **Resultados**

De acuerdo a los cálculos realizados en el punto 4 y considerando un tanque de día se tiene los siguientes resultados.

La capacidad de la bomba dosificadora de ácido Sulfúrico del sistema OI y considerando un factor de protección 2 es de  $0.00465 \text{ m}^3/\text{h}$ .

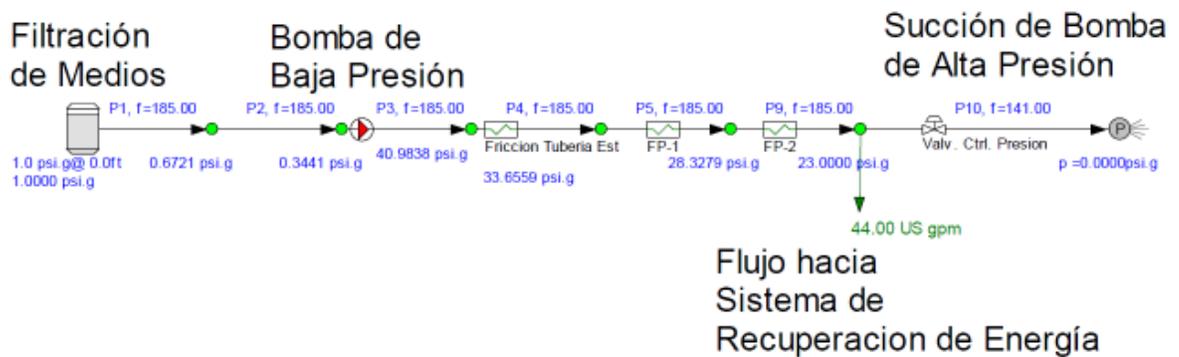
El volumen del tanque de día de ácido sulfúrico del sistema OI que se requiere es de  $0.1095 \text{ m}^3$ .

## **Conclusiones**

La capacidad de la bomba dosificadora de ácido sulfúrico del sistema OI deberá ser de  $0.00465 \text{ m}^3/\text{h}$  considerando un factor de protección de 2, el volumen del tanque de ácido sulfúrico OI se requiere de  $0.1095 \text{ m}^3$  para un tanque de día.

#### 4.4. Resultados hidráulicos en el programa PIPE FLOW para selección del equipo de bombeo

Los sistemas de bombeo son utilizados para aumentar la carga hidráulica del agua (Viessman *et al.*, 2009) y permiten el transporte a través de tuberías y el almacenamiento temporal de los fluidos, de forma que se cumplan las especificaciones de caudal y presión necesarias en los diferentes sistemas y procesos (Blanco-Marigorta *et al.*, 1994).



En esta simulación se estima el punto de operación de las bombas con las siguientes observaciones:

- 1) El Filtro Pulidor (FP-1) se le estima una caída de presión alta (5 psid) para asumir que el filtro pulidor tiene ensuciamiento.
- 2) El Filtro Pulidor (FP-2) se le estima una caída de presión alta (5 psid) para asumir que el filtro pulidor tiene ensuciamiento.
- 3) La ubicación de la bomba de baja presión sigue pendiente durante la fase de selección inicial, se estima que las pérdidas por fricción de tubería es de 7 psi. (Criterio de Bases de Diseño Islas).
- 4) Para poder ajustar la presión de operación cuando los filtros estén limpios, se ajusta la "Valvula Control Presion" para llegar al flujo de Operación de la Planta.

**Figura 4.2.** Diagrama esquemático de programa PIPE FLOW.

El programa Pipe Flow Expert determinó en base a la simulación la CDT requerida para la bomba de baja presión; la bomba de alta presión es determinada a lo establecido por el proceso de ósmosis inversa de acuerdo al software ROSA. Posteriormente se seleccionaron los equipos de bombeo con los siguientes valores obtenidos en las siguientes tablas (**Tabla 4.12 y Tabla 4.13**):

**Tabla 4.12.** Datos de selección para bomba de baja presión.

Datos de selección para bomba de baja presión	
Flujo de operación <sup>1</sup>	185 gpm
Flujo de diseño	191 gpm
Presión <sup>2</sup>	40 psig (92.4 ft CDT)
<sup>1</sup> Cálculos obtenidos por ROSA	
<sup>2</sup> Cálculos obtenidos por Pipe Flow Expert	

En el Anexo (**A.5. Curva de operación de bomba de baja presión**) se visualiza en la curva de del fabricante de la bomba el punto de operación de la bomba de acuerdo a los datos de la **Tabla 4.12**.

**Tabla 4.13.** Datos de selección para bomba de alta presión.

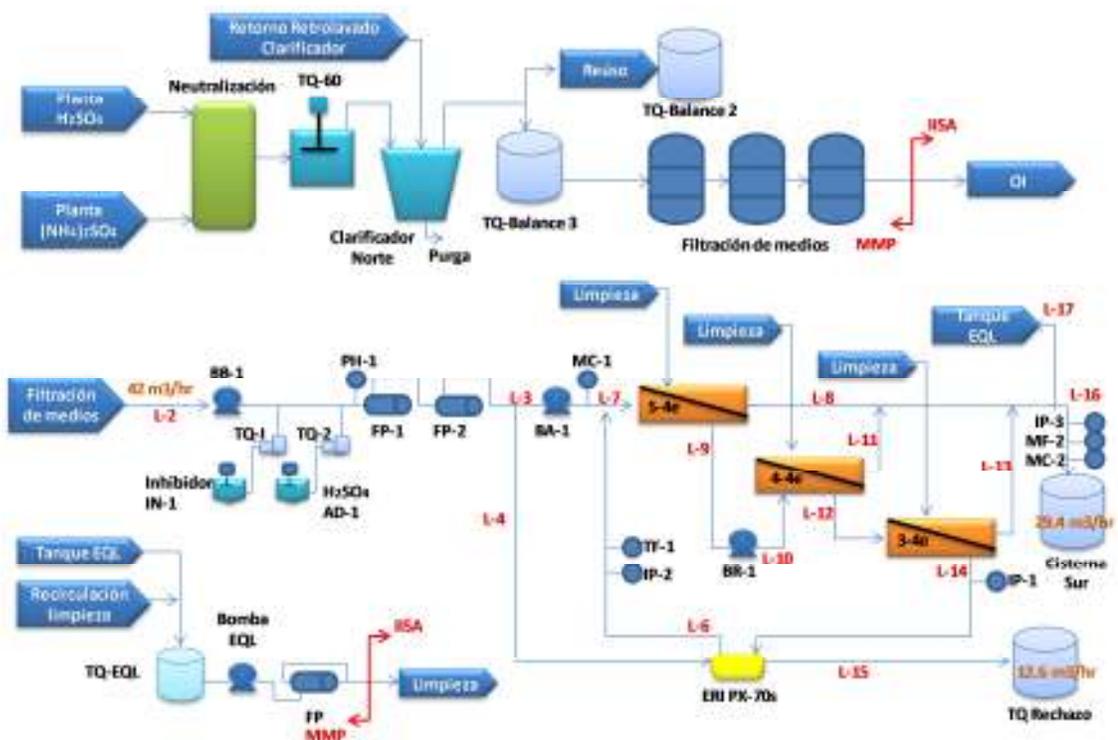
Datos de selección para bomba de alta presión	
Flujo de operación <sup>1</sup>	131 gpm
Flujo de diseño <sup>2</sup>	141 gpm
Presión <sup>3</sup>	350 psig (808.5 ft CDT)
<sup>1</sup> Cálculos obtenidos por M.C. ERI PX 70s (131 gpm)	
<sup>2</sup> Flujo para selección de bomba	
<sup>3</sup> Cálculos obtenidos por ROSA	

En el Anexo (**A.6. Curva de operación de bomba de alta presión**) se visualiza en la curva de del fabricante de la bomba el punto de operación de la bomba de acuerdo a los datos de la **Tabla 4.13**.

Ambas selecciones con un pequeño factor de protección por criterios de diseño.

#### 4.5. Descripción de lógica del proceso

Este proyecto de Ósmosis Inversa se diseñó para reutilizar agua de proceso de la planta MMP Suavización II de Met-Mex Peñoles S.A. de C.V. en la ciudad de Torreón, Coahuila, México, para producir agua para reutilización en sus procesos. De acuerdo al siguiente DFP (**Figura 4.3**) se muestra que el desarrollo del proceso se inicia una vez que el flujo de los efluentes de las plantas de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) y sulfato de amonio  $((NH_4)_2SO_4)$ , pase a través de sus sistemas de neutralización, tanque de floculación/coagulación (TQ-60) y clarificación, pasando una parte del flujo al tanque balance 2 para reúso y la otra parte del flujo es almacenado al tanque de balance 3 que posteriormente se conducirá a un sistema de filtración, lo anterior con límite de batería por parte de MMP, siguiendo el proceso con el sistema de Osmosis Inversa con límite de batería por IISA y por último el permeado se enviara a la Cisterna Sur de su planta nuevamente con límite de batería de MMP.



**Figura 4.3.** Diagrama de Flujo de Proceso para descripción de la planta desmineralizadora de agua salobre.

El sistema de Ósmosis Inversa está compuesto por un paso de tres etapas con una recuperación estimada del 70% (**Figura 4.4. y Figura 4.5**), que a continuación se describe la operación del proceso que es alcance de Industrias Islas por medio de números de serie en los equipos y números de línea para su identificación en el DFP elaborado en programa Power Point, también se puede visualizar el DFP elaborado en el programa AutoCAD(**Anexo A.6.**).

- a) Después de haber pasado el flujo a través del sistema de filtración de medios existente (suministro por Peñoles) el agua es transportada por la línea (L-2) la cual alimenta a la bomba de baja presión (BB-1), posteriormente el agua se acondiciona mediante la adición de un inhibidor de incrustaciones en línea (L-2) con la finalidad de evitar la saturación y precipitación de sales dentro de la membrana. La dosificación del inhibidor de incrustaciones se realiza mediante la bomba dosificadora de inhibidor de incrustaciones (IN-1) la cuál succiona el inhibidor del tanque de almacenamiento (TQ-1).
- b) El ajuste de pH se realizará mediante la adición de ácido sulfúrico (L-2). La dosificación ácido sulfúrico se realiza mediante la bomba dosificadora de ácido sulfúrico (AS-1) la cuál succiona el ácido sulfúrico del tanque de almacenamiento (TQ-2).
- c) Posteriormente a la dosificación de químicos se cuenta con un analizador de PH en línea (L-2) el cual tiene un ajuste menor a 6.5 unidades de PH antes de alimentar a la Osmosis Inversa.
- d) Después de acondicionada el agua químicamente, se hace pasar a través de dos Filtros Pulidores de cartucho que conectarán en serie; en donde se retienen partículas mayores a 5 micras (FP-1) y 1 micra (FP-2).
- e) Posteriormente, el agua que sale del filtro pulidor se divide en dos cabezales (L-3 y L-4); la línea (L-3) alimenta a una bomba de alta presión (BA-1) y la línea (L-4) alimenta a un sistema de intercambio de energía (ERI PX-70s). El intercambiador de energía tiene el objetivo de reducir la

cantidad de energía consumida por la bomba de alta presión, intercambiando la energía de la línea de rechazo por una porción del flujo de alimentación a la Ósmosis Inversa.

- f) El agua de alimentación que pasa por el intercambiador de energía, es conducida por la línea (L-6) a la línea de alimentación del sistema de osmosis inversa que se interconecta (L-7) con el flujo proveniente de la bomba de alta (BA-1).
- g) Una vez que el flujo de descarga de la bomba de alta presión y el sistema de recuperación de energía (L-6 y L-7), el agua es conducida por la línea (L-7) para alimentar al sistema de ósmosis inversa. El agua alimentada al sistema de ósmosis inversa consistente en un solo paso de tres etapas de un arreglo 5/4/3 donde cada recipiente contiene 4 membranas para agua de mar modelo SW30HR-LE400.
- h) El agua de rechazo de la primera etapa llega hasta la bomba booster (BR-1) a través de la línea (L-9) que está instalada entre la primera y segunda etapa del sistema de osmosis inversa, la cual tiene la función de aumentar la presión del agua y así poder alimentar a la segunda etapa del módulo de osmosis inversa a través de la línea (L-10). El permeado de cada recipiente sale por el extremo opuesto del recipiente y se junta en la línea (L-8).
- i) El rechazo de la segunda etapa pasa por una tubería en acero inoxidable a través de la línea (L-12) para alimentar a la tercera etapa del módulo de ósmosis inversa. El permeado de cada recipiente sale por el extremo opuesto del recipiente y se junta en una tubería PVC a través de la línea (L-11).
- j) El rechazo de la tercera etapa de la osmosis inversa pasa por medio de una tubería en acero inoxidable a través de la línea (L-14) en la cual se tendrá una medición de presión (IP-1) posteriormente alimenta al intercambiador de energía en el cual se alimenta a alta presión y

descarga a una baja presión, posterior a esto se cuenta con un indicador de presión (IP-2) y otro transmisor de flujo (TF-1) en donde se tiene un ajuste de entre 47 y 65 GPM; en dado caso de que el valor de flujo esté fuera de dicho parámetro, se enviara una alarma al operador a través del PLC y además se deberá realizar un paro de la planta, este rechazo se descarga al tanque de rechazo a través de la línea (L-15). El permeado de cada recipiente sale por el extremo opuesto del recipiente y se junta en una tubería PVC en la línea (L-13).

- k) El permeado de cada una de las etapas se juntan en un cabezal común en PVC a través de la línea (L-16) donde se mide la presión (IP-3), flujo TF-2) y conductividad (IC-1) del permeado de ósmosis inversa. Una parte del permeado alimenta al tanque de limpieza (L-17). El producto es enviado a la Cisterna Sur, la cual es proporcionada por el cliente.

A continuación se muestra dos imágenes de la planta de OI (**Figura 4.4. y Figura 4.5**):



**Figura 4.4.** Vista A de planta de OI instalada en Peñoles.



**Figura 4.5.** Vista B de planta de OI instalada en Peñoles.

#### 4.6. Descripción del listado seleccionado de equipos

Como menciona (Bartels *et al.*, 2010), los ingenieros deben elegir el tipo de membranas, configuración de la matriz de la membrana, un esquema de la membrana de uno o dos pasos, el uso de bombas de carga de entre etapas, las tasas de flujo, recuperaciones, productos químicos de control de escala, estrategias de limpieza, y los métodos de control biológico si es requerido.

De esta forma se consideró todo lo necesario en cuanto a literatura, criterios de diseño y metodologías. Después de obtener los resultados donde se muestran los valores necesarios como flujos, presiones, dosificaciones de químicos y tomando en cuenta calidades de agua de alimentación y cálculos hidráulicos de para el equipo de bombeo, en el cual sí se colocó una bomba booster entre las etapas 1 y 2, la cual fue dimensionada por el proveedor del ERI; todo lo anterior para la óptima selección y dimensionamiento de equipos del sistema para el cual se muestra en seguida para concluir el proyecto:

**Tabla 4.14.** Listado de equipos de pretratamiento.

DOSIFICACION DE QUÍMICOS POR MODULO	
Dosificadora de inhibidor de incrustaciones	Dos (2) piezas (1 en operación + 1 en espera)
Capacidad (gph)	1
Dosificadora de ácido sulfúrico	Dos (2) piezas (1 en operación + 1 en espera)
Capacidad (gph)	3.3
FILTRO PULIDOR	
Tipo	Cartucho
Cantidad	Dos (2) piezas
Material housing	FRP
Longitud cartuchos	60"
Material	Polipropileno extruido
Retención	> 5 micra

**Tabla 4.15.** Listado de equipos de bombeo.

BOMBA DE BAJA PRESION	
Cantidad	Una (1) pieza
Flujo de operación (gpm)	185

Presión de operación	40.00 PSIG
Variador	Incluido
Potencia (hp)	10
Velocidad	3600 RPM
<b>BOMBA DE ALTA PRESION</b>	
Cantidad	Una (1) pieza
Flujo de operación (gpm)	140
Presión de operación	350.00 PSIG
Variador	Incluido
Potencia (hp)	50
Velocidad	3600 RPM
<b>RECUPERADOR DE ENERGIA</b>	
Modelo	PX 70S
Cantidad	Una (1) pieza
<b>BOMBA BOOSTER</b>	
Modelo	HP1253
Cantidad	Una (1) pieza
Potencia (hp)	10
Variador	Incluido

**Tabla 4.16.** Listado de equipos de sistema de Ósmosis Inversa.

<b>DISEÑO</b>	<b>ÓSMOSIS INVERSA</b>
Numero de Módulos	Un (1) módulo
Producción por módulo	129.50 GPM
Recuperación	70%
Flujo de Alimentación	185.00 GPM
Flujo de Rechazo	55.50 GPM
Arreglo	5/4/3-4e
Temperatura de Diseño	25 ± 5 °C
Presión de Alimentación	350.00 PSIG
<b>ALCANCE</b>	
<b>POR MÓDULO</b>	
Recipientes de presión	CODELINE
Cantidad	12
Membranas	SW30HRLE-400
Marca	FILMTEC
Cantidad	48
<b>INSTRUMENTACIÓN</b>	
<b>POR MÓDULO</b>	
Medidores de flujo	Dos (2) en alimentación y producto
Medidores de conductividad	Dos (2) en alimentación y producto
Medidor de pH	Una (1) en alimentación
Interruptor de presión diferencial	Tres (3) piezas
Interruptor de alta y baja presión	Cuatro (4) piezas
Manómetros por módulo	Ocho

La Laguna no es una zona donde se pueda tolerar el desperdicio del agua. El acuífero Principal es uno de los "focos rojos" a nivel nacional debido a su sobreexplotación, pues cada año se extraen mil 10 millones de metros cúbicos (Mm<sup>3</sup>) y se recargan solamente 520 millones, es decir, 490 no se recuperan (Canedo, 2013). De acuerdo a la estadística de la literatura, la planta desmineralizadora será capaz de reusar anualmente la cantidad de 285,420 m<sup>3</sup> de agua tratada, agua que no será extraída del acuífero principal como primer uso.

## 5. CONCLUSIONES

De acuerdo a la metodología empleada se puede concluir que:

1. Se obtuvo el diseño de una de las tecnologías más antiguas para el tratamiento de agua; la ósmosis inversa, estando vigente y demostrando ser una tecnología sofisticada y eficaz. El diseño constó en desmineralizar agua salobre de Industrias Peñoles, en el que fue primordial producir agua tratada para reúso en los diversos procesos industriales que a ellos convengan, entre ellos calderas de baja presión y además el de contenerizar el rechazo de la ósmosis inversa para la recuperación de minerales, efluente que debe de someter a un postratamiento para su óptima recuperación, siendo alcance de Industrias Peñoles.
2. El diseño se obtuvo gracias al sistema de simulación avanzada ROSA (Reverse Osmosis System Analysis) de Dow Water & Process Solutions para su línea de membranas marca FILMTEC™ y demostró que la planta desmineralizadora de agua salobre cumple con las expectativas del cliente, la cual es capaz de dar calidad a gran cantidad de agua para que pueda ser considerada para reúso y así contribuir a la no sobreexplotación de mantos acuíferos de la Comarca Lagunera como agua de primer uso.

## **6. PERSPECTIVAS**

Después de la exhausta investigación es de suma importancia que más industrias y sectores agrícolas se unan a mejorar los procesos del uso y reúso del agua, debido a la escasez de agua que presenta en general la zona norte del país. Esto debido a que estos dos principales sectores son los que más agua utilizan en sus procesos.

La autoridad debe tomar más en cuenta estas situaciones, para controlar el uso del recurso hídrico de una forma más sustentable y apoyando con programas de financiamiento a aquellas empresas con la intención de optar por tecnologías de tratamiento de agua.

También se espera que se sigan haciendo más investigaciones acerca de toda la gama de posibilidades sobre las tecnologías para el tratamiento de agua y así contribuir a una cadena de buenas prácticas que hagan conciencia.

## 7. RECOMENDACIONES

De acuerdo a la experiencia de treinta años de la empresa Industrias Islas S.A. de C.V. en el tratamiento de agua por Ósmosis Inversa:

Se recomienda que para poder interpretar y controlar las desviaciones de un proceso de Ósmosis Inversa es necesario conocer las posibles alteraciones que se puedan presentar a través de su periodo de operación, dichas variables son: presiones, flujos, pH y conductividad, a partir de las cuales se determina la efectividad de la planta.

### a) Presiones

- Si el diferencial de presión de las membranas aumenta de un 10 a un 15% comparado con valores de arranque normalizados se procederá a hacer limpieza química del módulo de OI.
- Alto diferencial de presión en los filtros pulidores de las unidades de ósmosis inversa o del equipo de limpieza, dos ó tres veces mayor al inicial, significa un grado de ensuciamiento en los cartuchos que debe ser corregido instalando nuevos cartuchos.
- Bajo o cero diferencial de presión en los filtros pulidores de la OI o del equipo de limpieza, significa rotura o mal acomodo de los cartuchos filtrantes, en este caso se debe parar y revisar para corregir la desviación.
- La presión mínima de succión requerida de las bombas de alta presión es de 10 psi. Si no se tiene suficiente presión en la succión, se debe suspender la operación, revisar que llegue suficiente agua a las bombas, verificar que las válvulas del interruptor estén abiertas o identificar qué falla pudo ocasionar este problema.
- La presión en la entrada de los recipientes de presión puede cambiar hasta 20 psi por cada cuatro grados centígrados que baje la temperatura del agua. Si las condiciones de baja temperatura permanecen por varios días, se debe solicitar una proyección (en el software de diseño ROSA) a

la nueva temperatura para confirmar y establecer las nuevas condiciones de operación.

#### **b) Flujos**

- Una diferencia del  $\pm 10\%$  del flujo de arranque normalizado indican un posible problema con las membranas de ósmosis inversa. Identificar qué lo causa y corregirlo.
- Si el flujo de rechazo es 2% menor a lo establecido 48 horas después del arranque, debe corregirse de inmediato, abriendo la válvula de rechazo.
- Cuando el flujo de rechazo es mayor al establecido en el arranque, no es grave, sólo no es rentable y también debe corregirse. Esto se consigue cerrando poco a poco la válvula de rechazo observando que se obtengan las presiones y los flujos iniciales de la planta.

#### **c) Porcentaje de paso de sales**

- Un aumento del 10 al 15% en el porcentaje de paso de sales normalizado comparado con el valor de arranque indica un posible problema de incrustaciones y/o fugas en el módulo de ósmosis inversa.

#### **d) Baja presión en la succión de la bomba**

- Se revisa que esté operando la bomba de transferencia de agua cruda (agua de alimentación) y que su presión de descarga sea normal.
- Revise que todas las válvulas necesarias para proveer agua a las bombas de alta presión, estén abiertas (válvulas de succión y descarga de la bomba de alimentación, entrada y salida de los filtros pulidores, succión de las bombas de alta presión y válvulas solenoides de alimentación a los módulos).
- Se revisan las presiones diferenciales de los filtros pulidores de cartuchos de las unidades de ósmosis inversa, ya que si existe una alta caída de presión en los filtros, es factible que el agua no llegue a la

bomba de alta presión con la presión suficiente. En caso de ser necesario, efectuar retrolavado o cambio de cartuchos filtrantes, según se requiera.

**e) Falla de pH**

- Revisar el pre-tratamiento anterior a los sistemas de ósmosis para identificar el origen de la variación de pH. Una vez que el problema se ha detectado, corregirlo. Si el problema no es detectado, se requerirá de un ajuste de pH antes de la entrada al sistema de osmosis para que las condiciones de agua de alimentación sean las adecuadas.

**f) Alta conductividad**

- Verificar con un instrumento portátil y calibrado la veracidad de la lectura, en caso de que sea necesario calibre el instrumento.
- Confirmar la conductividad del agua de alimentación.
- Revise el valor de conductividad normalizada para confirmar que la desviación en la calidad del producto no se deba a la variación de temperatura.

**g) Alta presión diferencial en el módulo de Ósmosis Inversa**

- Verificar que las condiciones de operación de cada planta (flujos, pH, conductividades y temperatura), sean las correctas.
- Verificar que las lecturas de los manómetros sean las correctas. Esto se logra restando la presión de alimentación menos la presión de rechazo de la segunda etapa. En caso de que las lecturas no concuerden, será necesario cambiar los manómetros.
- Si la presión diferencial alta se confirma, pare la planta correspondiente y destape los recipientes en la alimentación, pueden existir depósitos de fibra de los filtros o algún material extraño que no debe estar ahí.

#### **h) Bajo flujo de alimentación**

- Revisar que esté operando la bomba de agua cruda (o bomba de agua de alimentación) y que su presión de descarga sea normal.
- Revisar que todas las válvulas necesarias para proveer agua a la bomba de alta presión estén abiertas (válvulas de succión y descarga de la bomba de alimentación, válvulas de entrada y salida de los filtros pulidores y succión de las bombas de alta presión).
- Revisar las presiones diferenciales en los filtros, ya que si existe una alta caída de presión en uno o varios filtros, es factible que el agua no llegue a las bombas de alta presión con la presión suficiente requerida. En caso de ser necesario, efectuar el ciclo de retrolavado o cambio de cartuchos filtrantes, según corresponda.

## 8. LITERATURA CITADA

- Abdul-Hamid, F. (2011). Wastewater Reclamation and Reuse Technologies for Arid Environments. Kuwait Institute for Scientific Research National Scientific & Technical information Center: 4, 8.
- Avinash, P. 2012. "Treatment of distillery wastewater using membrane technologies " International Journal of Advanced Engineering Research and Studies 1.
- Bartels, C., R. Franks y K. Andes 2010. "Operational Performance and Optimization of RO Wastewater Treatment Plants." Singapore International Water Week, Singapore.
- Blanco-Marigorta, E., S. Velarde-Suárez y J. Fernández-Francos (1994). Sistemas de bombeo.
- Canedo, F. 2013. Persiste ineficiencia en riego. El Siglo de Torreón. Torreón, Coahuila
- Carabias, J., R. Landa, J. C. Moctezuma y P. Martínez (2005). Agua, Medio Ambiente y Sociedad: hacia la gestión integral de los recursos hídricos en México, Colegio De Mexico AC.
- Centro Virtual de Información del Agua 2012. Tipos de agua. <http://www.agua.org.mx/index.php/el-agua/que-es/tiposdeagua> [En línea]
- CONAGUA 2007. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento" Alcantarillado Pluvial, Mexico, DF: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales
- CONAGUA, C. N. d. A. 2012. Documento básico de líneas prioritarias de investigación, desarrollo tecnológico y formación de recursos humanos en materia de agua en México
- Chaparro, E. 2007. "Buenas prácticas en la Industria minera: el caso del Grupo Peñoles en México." Comisión Económica para América Latina y el Caribe 44-45.
- Chon, K., S. J. Kim, J. Moon y J. Cho 2012. "Combined coagulation-disk filtration process as a pretreatment of ultrafiltration and reverse osmosis membrane for wastewater reclamation: An autopsy study of a pilot plant." Water research 46: 1803-1816.

- EPA, E. P. A. 1987. "Water use statistics from the "National Water Summary 1987—Hydrologic Events and Water Supply and Use"."
- Estrada, A. 2011. "México es pionero en el reúso del agua: Blanca Jiménez." *Revista Digital Universitaria UNAM*: 3-9.
- FILMTEC 2012. Membrane elements. Japan, Dow Water & Process Solutions, 1
- García-Salazar, J. A., E. Guzmán-Soria y M. Fortis-Hernández 2006. "Demanda y distribución del agua en la Comarca Lagunera, México." *Colegio de Postgrados*.
- García-Salazar, J. A. y J. S. Mora-Flores 2008. "Tarifas y consumo de agua en el sector residencial de la Comarca Lagunera." *Región y Sociedad XX*: 120.
- Garud, R. M., S. V. Kore, V. S. Kore y G. S. Kulkarni 2011. "A Short Review on Process and Applications of Reverse Osmosis." *Universal Journal of Environmental Research and Technology* 1: 2.
- Goosen, M. F. A., S. S. Sablani, H. Al-Hinai, S. Al-Obeidani, R. Al-Belushi y D. Jackson 2004. Fouling of Reverse Osmosis and Ultrafiltration membranes: A critical review. *Separation Science and Technology*, Taylor & Francis. 39(10): 2261-2297
- Guzmán-Castro, J. E. 1998. Metodología de selección de equipos para planta de tratamiento de agua por ósmosis inversa. División de Ingeniería, ciencias naturales y exactas. San Pedro Garza García, N.L., México, Universidad de Monterrey
- Igunnu, E. T. y G. Z. Chen 2013. "Produced water treatment technologies." Faculty of Engineering, Department of Chemical and Environmental Engineering, and Energy and Sustainability Research Division, University of Nottingham: 4, 5, 11.
- INE 2002. "Cambio global y recursos hídricos en México: Hidropolítica y conflictos contemporáneos por el Agua." Dirección General de Investigación de Ordenamiento Ecológico y Conservación de Ecosistemas: 3-4.
- Kalogirou, S. A. 2005. "Seawater desalination using renewable energy sources." Elsevier Science Publishers B.V.: 1-7.

- Kang, G. y Y. Cao 2012. "Development of antifouling reverse osmosis membranes for water treatment: A review." Elsevier Science Publishers B.V.: 1.
- Kasher, R. 2009. "Membrane-based water treatment technologies: Recent achievements, and new challenges for a chemist." Bulletin of the Israel Chemical Society.
- Leal-Ascencio, M. T. 2005. "Tecnologías convencionales de tratamiento de agua y sus limitaciones." Instituto Mexicano de Tecnología del Agua: 1.
- Leal-Ascencio, M. T., S. Mirana, E. M. Otazo-Sánchez, F. Prieto-García y A. J. Gordillo 2009. "Contaminación por metales en la laguna El Limón, Chiapas, México." Redalyc: 3.
- Lee, H. J., S. J. Oh y S. H. Moon 2003. "Recovery of ammonium sulfate from fermentation waste by electrodialysis." Elsevier Science Publishers B.V.: 1-2.
- Mapiour, M., G. Gaadingwe y R. Mungroo 2007. Water treatment for ammonium sulfate wastewater Department of Chemical Engineering, University of Saskatchewan 59-60
- Moeller-Chávez, G., P. Mijaylova-Nacheva y V. E. Escalante-Estrada (2002). Evaluación de alternativas para reúso del agua en tres giros industriales. Gestión inteligente de los recursos naturales: desarrollo y salud, FEMISCA: 1-7.
- Molina, J. C. y S. E. Araiza 2011. "Peñoles en la agroindustria empresa orgullosamente mexicana." Redalyc 15: 2.
- Moreno B., J. A. 2011. Diseño de una planta de tratamiento de agua de ósmosis inversa para la empresa Dober Osmotech de Colombia LTDA. Tesis. Licenciatura.
- Muro, C., J. Escobar, R. E. Zavala, M. Esparza, J. Castellanos, G. R. M. y M. García 2009. "Evaluación del proceso de microfiltración en un efluente residual de una industria alimenticia para su reúso." Redalyc 25: 3.
- Naaktgeboren, A. J., G. J. Snijders y J. Gons 1988. "Characterization of a new Reverse Osmosis composite membrane for Industrial application." Elsevier Science Publishers B.V.: 13.

- Pacheco-Gutierrez, L. A. y M. C. Durán-Dominguez de-Bazúa 2007. "Uso del agua en la industria minera. Parte 2: Estudio de opciones para reciclar el agua." Redalyc 22: 2-4.
- Pangarkar, B. L., M. G. Sane y M. Guddad 2011. "Reverse Osmosis and Membrane Distillation for Desalination of Groundwater: A Review." International Scholarly Research Network.
- Paul, H. y A. M. Abanmy 1990. "Membrane fouling - The final frontier " Ultra Pure Water 7: 2.
- Pérez-González, A., A. M. Urtiaga, R. Ibáñez y I. Ortiz 2012. "State of the art and review on the treatment technologies of water reverse osmosis concentrates." Elsevier Science Publishers B.V.: 1-2.
- Pérez, G., A. R. Fernández-Alba, A. M. Urtiaga y I. Ortiz 2010. "Electro-oxidation of reverse osmosis concentrates generated in tertiary water treatment." Elsevier Science Publishers B.V.: 1.
- Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos 2009. Torreón, Coahuila de Zaragoza. C. g. 05035
- Reyes-Vidal, M. Y., A. Aceves-Diez, A. Martínez-Silva y A. Asaff 2012. "Investigación, desarrollo tecnológico e innovación para el cuidado y reuso del agua." Redalyc: 4.
- Robinson, G. W., S. Zhu, S. Singh y M. W. Evans (1996). Water in biology, chemistry and physics: Experimental overviews and computational methodologies
- Sagle, A. y B. Freeman 2005. "Fundamentals of Membranes for Water Treatment." University of Texas at Austin: 1-4.
- Samboni-Ruiz, N. E., Y. Carvajal-Escobar y J. C. Escobar 2007. "Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua." Ingeniería e Investigación 27: 172-181.
- Sarang, K., N. C. Rout, T. Subbaiah, S. Anand y R. P. Das 2004. "Recovery of ammonia/ammonium sulphate from synthetically prepared effluent streams." The European Journal of Mineral Processing and Environmental Protection 4: 1-9.

- Seng, W. A., N. Y. Yin, A. Tiraferri y M. Elimelech 2011. "Chemical cleaning of RO membranes fouled by wastewater effluent: Achieving higher efficiency with dual-step cleaning." *Journal of Membrane Science*: 1.
- Servicio Meteorológico Nacional 2014. Normales Climatológicas Torreón, Coahuila
- Shamel, M. M. y O. T. Chung 2006. "Drinking water from desalination of seawater: Optimization of reverse osmosis system operating parameters " *Journal of Engineering Science and Technology* 1: 6.
- Shinjuku-ku (1999). Kurita Handbook of Water Treatment Japan
- Soto-Balderas, J. y M. M. Gómez-Guijarro 2009. "Problemática ambiental en la Región Lagunera. Disponibilidad, extracción y calidad del agua." *CIENCIACIERTA.uadec.mx* 17.
- Soto-Balderas, J. y M. M. Gómez-Guijarro 2012. "Actores sociales y arsénico. La contaminación del agua en la Región Lagunera." *CIENCIACIERTA.uadec.mx*.
- Tanaka, H. y Y. S. Ho 2010. "Global trends and performances of desalination research." *Deswater*: 2.
- Valdivia-Medina, R. Y., S. Pedro-Valdés y M. Laurel-Gómez 2010. "Agua para uso en laboratorios." *Redalyc*: 3.
- Valenzuela-Marín, T. d. J. 2004. Exploración de posibilidades para proponer un tren de tratamiento para remoción de dureza que logre la optimización técnica y económica del proceso. *Ingeniería Química y Alimentos*. Cholula, Puebla, México, Universidad de las Américas Puebla
- Valiente, A. (1997). Problemas de balance de materia y energía en la industria alimentaria, Noriega Editores.
- Viessman, W., M. J. Hammer y E. M. Perez (2009). *Water supply and pollution control*, Pearson Prentice Hall.
- Williams, M. E. 2003. "A Review of Wastewater Treatment by Reverse Osmosis." Corporation and Williams Engineering Services Company, Inc.: 11.

## ANEXOS

### A.1. Conceptos básicos

#### **Ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>):**

Es un compuesto químico extremadamente corrosivo cuya fórmula es H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Es el compuesto químico que más se produce en el mundo, por eso se utiliza como uno de los tantos medidores de la capacidad industrial de los países. Una gran parte se emplea en la obtención de fertilizantes. Se usa para la síntesis de otros ácidos y sulfatos y en la industria petroquímica. También se usa para ajuste de pH.

#### **Acuífero:**

Cualquier formación geológica o conjunto de formaciones geológicas hidráulicamente conectados entre sí, por las que circulan o se almacenan aguas del subsuelo que pueden ser extraídas para su explotación, uso a aprovechamiento y cuyos límites laterales y verticales se definen convencionalmente para fines de evaluación, manejo y administración de las aguas nacionales del subsuelo.

#### **Alimentación:**

Es el agua cruda ó bruta que será transferida hacia el sistema de ósmosis inversa.

#### **Arreglos de equipo:**

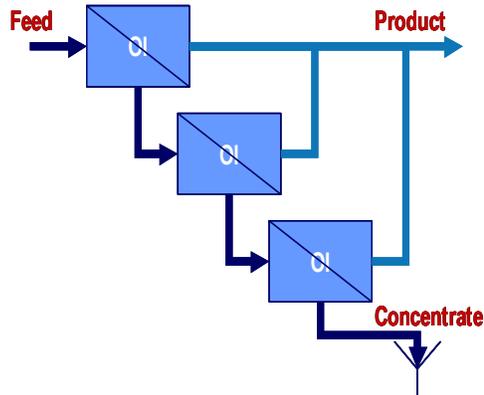
Es la forma en la que están combinadas las membranas dentro de los recipientes de alta presión y se representa mediante la combinación de números divididos por el signo (/), en el cual representa la cantidad de recipientes por etapa, en consecuencia del signo (-), en el cual representa la cantidad de elementos de membrana por cada recipiente de presión:

Para tener una idea más clara se presenta el siguiente ejemplo:

**Arreglo: 5/4/3-4**

Lo anterior significa que es un módulo de ósmosis inversa de tres etapas, en la primera de cinco recipientes, en la segunda cuatro recipientes y en la tercera tres recipientes, complementado cada recipiente con cuatro membranas.

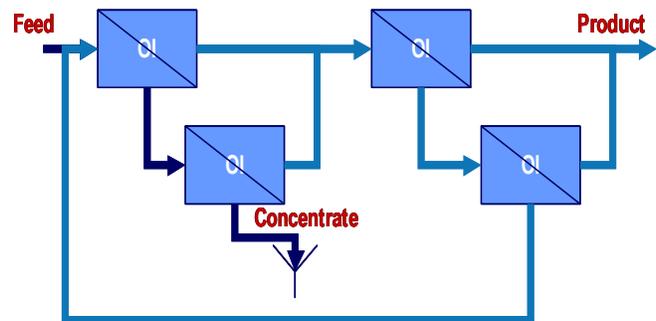
Lo anterior se especifica en el siguiente ejemplo:



Un paso con 3 etapas  
Arreglo 6/3/1-4  
Recipientes = 10  
Membranas = 40

Dos pasos con 2 etapas cada uno

Arreglo:  
Primer Paso: 4/2-6  
Segundo Paso: 2/1-6  
Recipientes = 9  
Membranas = 54



### Balance de materia:

El balance de materia de un proceso industrial es una contabilidad exacta de todos los materiales que entran, salen, se acumulan o se agotan en un intervalo de operación dado.

Se pueden distinguir cuatro tipos de balances de materia dependiendo del tipo de sistema:

- Acumulación = Entrada - Salida + Generación – Consumo.  
Es un sistema con entradas, salidas y reacciones químicas.
- Acumulación = Entrada – Salida

Sistema sin reacciones químicas.

- Entrada = Salida.

Sistema en estado estacionario, no hay acumulación ni reacciones químicas.

- Acumulación = Generación – Consumo

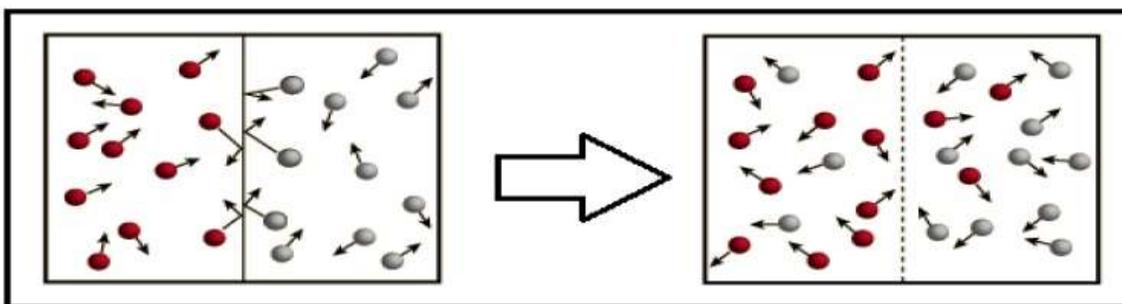
Sistema sin corrientes de entrada ni de salida, pero con reacción química.

### Concentrado (rechazo):

Es donde se concentran se concentran todas las sales y partículas disueltas que retuvo la membrana del agua cruda.

### Difusión:

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



Difusión de moléculas.

### Dureza:

La dureza del agua se debe principalmente a las sales de calcio y magnesio; algunas veces, al hierro y al aluminio. La mayor parte del calcio y el magnesio

presentes en el agua natural se encuentra bajo la forma de bicarbonatos, sulfatos y, ocasionalmente, cloruros y nitratos.

**Efluente:**

La salida o flujos salientes de cualquier sistema que despacha flujos de agua, a un tanque de oxidación, a un tanque para un proceso de depuración biológica del agua, etc. Este es el agua producto dada por el sistema.

**Índice de Langelier:**

Se usa para determinar el equilibrio del agua.

**pH:**

El pH es un índice logarítmico del grado de acidez o alcalinidad de una disolución acuosa. Este índice es logarítmico por que se expresa mediante un exponente (en base 10) que es fácil de manejar.

**Ósmosis:**

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

**Ósmosis Inversa:**

Es un proceso hecho por el hombre en el cuál se aplican altas presiones a la solución concentrada para vencer la presión osmótica y atravesar la membrana semipermeable, logrando así que el exceso de sales se quede en la membrana semipermeable y solo pase el agua pura como producto o permeado.

**Presión de alimentación:**

Es determinada por el equipo de bombeo de alta presión seleccionado y que se localiza antes del módulo de ósmosis inversa y después de los equipos de pretratamiento.

**Presión osmótica:**

Esa especie de impulso de la naturaleza que obliga al líquido a pasar de un lado al otro se llama presión osmótica. Para entender cómo actúa la presión osmótica, entonces es necesario conocer lo siguiente: las primeras medidas de presión osmótica, mostraron que para una solución la presión osmótica,  $\pi$ , a temperatura constante varía aproximadamente en razón directa de la concentración de la solución, ( $\pi/c = \text{constante}$ ). El valor de se calcula con la Ecuación de Van'tHoff, donde vio en esto una analogía con la ley de Boyle para los gases, ( $\pi V = \text{constante}$ ).

Posteriormente se demostró que la presión osmótica es directamente proporcional a la temperatura absoluta ( $\pi/T = \text{constante}$ ), en analogía a la ley de los gases de Gay-Lussac. Además las dos relaciones pueden ser combinadas en la siguiente:

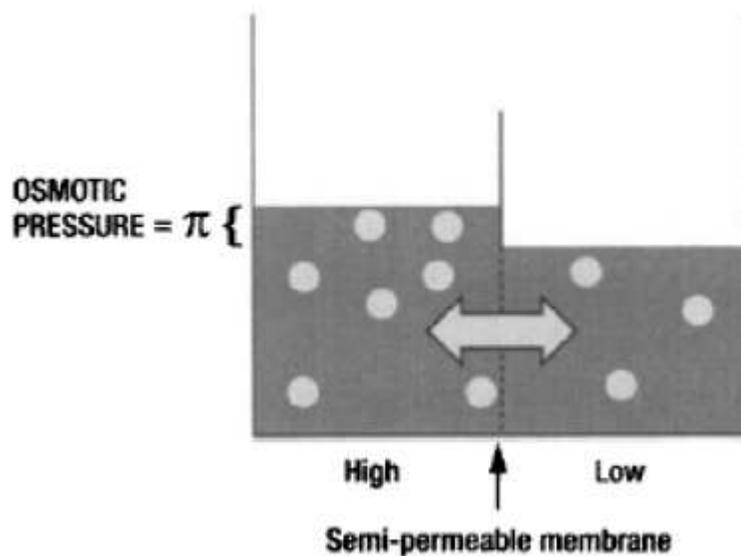
$$\pi V = RT$$

Dónde:

R = 0.082 Constante de los gases ideales (litros x atm / Kelvin x Mol)

T = Temperatura absoluta (grados Kelvin)

Se puede visualizar fácilmente como interactúa la presión osmótica en el proceso de osmosis en la siguiente figura.



Presión osmótica en proceso de ósmosis.

**Producto (permeado):**

Es el agua que se obtiene de la membrana una vez que esta retuvo las sales y partículas disueltas y que contiene la calidad adecuada para su consumo.

**Recipiente:**

Tubo resistente a altas presiones donde se introducen las membranas semipermeables.

**Recuperación:**

Es la capacidad de rechazo de sales de la membrana y se determina mediante la medición de los flujos y concentraciones de la forma en la que se desarrollo con respecto a las ecuaciones de balance.

**Solución:**

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

**Soluto:**

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

**Solvente:**

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

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

**Sulfato de amonio ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>):**

Es una sal cuya fórmula química es (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Tiene varios usos, es un fertilizante químico de uso agrícola con un contenido de 21% de nitrógeno y 23.4% de azufre, que sirve para la elaboración de mezclas físicas y con facilidad de aplicación al suelo. Es de doble acción ya que aporta dos macronutrientes vegetales y por su contenido de azufre favorece las condiciones físicas y químicas de los terrenos agrícolas. También se puede utilizar como floculante.

## A.2. Memoria de Cálculo sistema de Ósmosis Inversa de software ROSA

ROSA Detailed Report

Página 1 de 3

Reverse Osmosis System Analysis for FILMTEC™ Membranes

ROSA 7.2.7 ConfigDB u392554\_146

Project: MMP SUAV 7 AGO 31 A NOV 6 2012

Case: 4

EGM, MMP SUAVIZACION 2

11/6/2012

**Project Information:** PROYECCION CON 50 % MAYOR DE STD DEL ULTIMO ANALISIS Y ARREGLO DE TRES ETAPAS CASO 4 MAYOR CANTIDAD DE STD Y BOOSTER EN ETAPA 3

### Case-specific:

### System Details

Feed Flow to Stage 1	185.00 gpm	Pass 1 Permeate Flow	120.80 gpm	Osmotic Pressure:	
Raw Water Flow to System	185.00 gpm	Pass 1 Recovery	70.00 %	Feed	94.70 psig
Feed Pressure	351.39 psig	Feed Temperature	29.0 C	Concentrate	311.31 psig
Flow Factor	1.00	Feed TDS	12072.52 mg/l	Average	203.00 psig
Chem. Dose (100% H2SO4)	0.05	Number of Elements	48	Average NDP	172.74 psig
Total Active Area	19200.00 ft <sup>2</sup>	Average Pass 1 Flux	9.71 gfd	Power	39.40 kW
Water Classification: Tertiary Effluent (Microfiltration) SDI < 3				Specific Energy	5.07 kWh/kgal

Stage	Element	#PV	#El	Feed Flow (gpm)	Feed Press (psig)	Recirc Flow (gpm)	Conc Flow (gpm)	Conc Press (psig)	Perm. Flow (gpm)	Avg Flux (µfd)	Perm Press (psig)	Boost Press (psig)	Perm TDS (mg/l)
1	SW30HRLE-400i	5	4	185.00	346.39	0.00	111.43	335.57	73.57	13.24	20.00	0.00	23.11
2	SW30HRLE-400i	4	4	111.43	330.57	0.00	78.30	322.68	33.12	7.45	20.00	0.00	59.89
3	SW30HRLE-400i	3	4	78.30	312.68	0.00	66.80	308.16	22.80	6.84	20.00	66.00	62.28

Name	Feed	Adjusted Feed	Pass Streams (mg/l as l/m)										
			Concentrate			Permeate							
			Stage 1	Stage 2	Stage 3	Stage 1	Stage 2	Stage 3	Total				
NH4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	4000.00	4017.35	6664.34	9474.00	13352.80	8.45	21.93	33.79	16.36				
Mg	50.00	50.00	83.00	118.09	166.57	0.02	0.05	0.08	0.04				
Ca	60.12	60.12	90.80	141.00	200.20	0.02	0.04	0.06	0.03				
Sr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
CO3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
HCO3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
NO3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
Cl	2385.00	2385.00	3953.05	5613.94	7903.82	10.17	26.50	40.83	19.74				
F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
SO4	5500.00	5500.05	9128.96	12986.06	18315.29	4.03	10.26	15.81	7.70				
SiO2	60.00	60.00	99.34	140.90	198.10	0.42	1.09	1.67	0.81				
Boron	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
CO2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
TDS	12055.14	12072.52	20028.49	28474.97	40136.88	23.11	59.89	92.28	44.70				
pH	8.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00				

Permeate Flux reported by ROSA is calculated based on ACTIVE membrane area. DISCLAIMER: NO WARRANTY, EXPRESSED OR IMPLIED, AND NO WARRANTY OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, IS GIVEN. Neither FilmTec Corporation nor The Dow Chemical Company assume any obligation or liability for results obtained or damages incurred from the application of this information. Because use conditions and appropriate laws may differ from one location to another and may change with time, customer is responsible for determining whether products are appropriate for customer's use. FilmTec Corporation and The Dow Chemical Company assume no liability, if, as a result of customer's use of the ROSA membrane design software, the customer should be sued for alleged infringement of any patent not owned or controlled by the FilmTec Corporation nor The Dow Chemical Company.

Reverse Osmosis System Analysis for FILMTEC™ Membranes  
 Project: MMP SUAV 2 AGO 31 A NOV 6 2012  
 EGM, MMP SUAVIZACION 2

ROSA 7.2.7 ConfigDB u392554\_146  
 Case: 4  
 11/6/2012

**Design Warnings**

-None-

**Solubility Warnings**

SiO<sub>2</sub> (% Saturation) > 100%

Antiscalants may be required. Consult your antiscalant manufacturer for dosing and maximum allowable system recovery.

**Stage Details**

Stage 1 Element Recovery		Perm Flow (gpm)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (gpm)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (psig)
1	0.12	4.26	16.52	37.00	12072.52	346.39
2	0.12	3.89	20.38	32.74	13642.04	342.93
3	0.12	3.49	25.62	28.84	15480.56	340.02
4	0.12	3.07	32.88	25.35	17610.33	337.59
Stage 2 Element Recovery		Perm Flow (gpm)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (gpm)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (psig)
1	0.09	2.62	41.95	27.86	20028.49	330.57
2	0.09	2.24	53.27	25.24	22103.67	328.20
3	0.08	1.88	68.58	22.99	24255.00	326.13
4	0.07	1.54	89.50	21.11	26407.46	324.31
Stage 3 Element Recovery		Perm Flow (gpm)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (gpm)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (psig)
1	0.10	2.58	60.87	26.10	28474.97	412.68
2	0.09	2.09	81.22	23.52	31588.77	410.52
3	0.08	1.65	110.04	21.43	34667.38	408.63
4	0.06	1.28	150.89	19.78	37558.70	406.96

Permeate Flux reported by ROSA is calculated based on ACTIVE membrane area. DISCLAIMER, NO WARRANTY, EXPRESSED OR IMPLIED, AND NO WARRANTY OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, IS GIVEN. Neither FilmTec Corporation nor The Dow Chemical Company assume any obligation or liability for results obtained or damages incurred from the application of this information. Because our conditions and applicable laws may differ from one location to another and may change with time, customer is responsible for determining whether products are appropriate for customer's use. FilmTec Corporation and The Dow Chemical Company assume no liability, if, as a result of customer's use of the ROSA membrane design software, the customer should be used for alleged infringement of any patent not owned or controlled by the FilmTec Corporation nor The Dow Chemical Company.

**Sealing Calculations**

	Raw Water	Adjusted Feed	Concentrate
pH	8.00	7.00	7.00
Langelier Saturation Index	-6.81	-7.83	-6.84
Stiff & Davis Stability Index	+7.39	-8.41	+7.90
Ionic Strength (Molal)	0.25	0.25	0.84
TDS (mg/l)	12055.14	12072.52	40136.88
HCO <sub>3</sub>	0.00	0.00	0.00
CO <sub>2</sub>	0.00	0.00	0.00
CO <sub>3</sub>	0.00	0.00	0.00
CaSO <sub>4</sub> (% Saturation)	14.43	15.10	56.81
BaSO <sub>4</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
SeSO <sub>4</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
CaF <sub>2</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
SiO <sub>2</sub> (% Saturation)	41.26	45.11	148.95
Mg(OH) <sub>2</sub> (% Saturation)	0.02	0.00	0.00

To balance: 17.33 mg/l Na added to feed.

## A.3. Hoja de especificaciones de membrana SW30HR LE-400

Product Information



### DOW™ FILMTEC™ Membranes

DOW FILMTEC SW30HR LE-400 Seawater Reverse Osmosis Element

#### Features

Dow Water & Process Solutions offers various premium seawater reverse osmosis (RO) elements designed to reduce capital and operation cost of seawater RO systems. DOW™ FILMTEC™ elements combine premium membrane performance with automated precision fabrication and maximize system output to provide unprecedented performance.

The DOW™ FILMTEC™ SW30HR LE-400 element offers a combination of high rejection and low energy requirements to allow lower total costs with medium and high salinity feedwater. Benefits of the DOW FILMTEC SW30HR LE-400 element include:

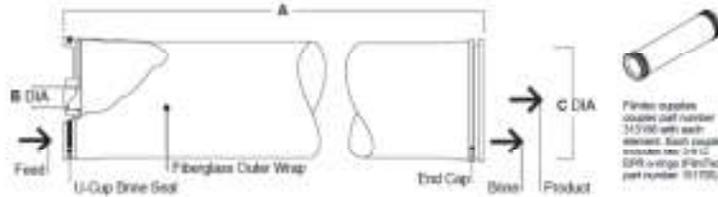
- Enables systems to be designed and operated to optimize operating cost through lower energy consumption or to optimize capital cost through higher productivity at lower operating fluxes.
- High NaCl and boron rejection to help meet World Health Organization (WHO) and other drinking water standards.
- Effective use in permeate staged seawater desalination systems without impairing the performance of the downstream stage.
- High performance over the operating lifetime without the use of oxidative post-treatments. This is one reason DOW FILMTEC elements are more durable and may be cleaned more effectively over a wider pH range (1-13) than other RO elements.
- Automated, precision fabrication with a greater number of shorter membrane leaves reducing the effect of overall fouling and maximizing element efficiency, helping to lower your cost of operation.

#### Product Specifications

Product	Part number	Active area ft <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )	Maximum operating pressure psig (bar)	Permeate flow rate gpd (m <sup>3</sup> /d)	Stabilized boron rejection %	Minimum salt rejection %	Stabilized salt rejection %
SW30HR LE-400	217622	400 (37)	1,200 (83)	7,500 (28)	52	95 (5)	99.80

1. The above values are normalized to the following conditions: 32,000 ppm NaCl, 5 ppm boron, 600 psi (5.5 MPa), 77°F (25°C), pH 8, 8% recovery.
2. Permeate flows for individual elements may vary +/-15%.
3. Product specifications may vary slightly as improvements are implemented.
4. Active area guaranteed +/-5%. Active area as stated by Dow Water & Process Solutions is not comparable to the nominal membrane area figures often stated by some element suppliers. Measurement method described in Form No. 609-00434.

Figure 1



Product	Feed Spacer (mil)	Dimensions - inches (mm)		
		A	B	C
SW30HR LE-400	20	40 (1,016)	1.125 (29)	7.5 (201)

1. Refer to FilmTec Corporation Design Guidelines for multiple-element systems.
  2. Elements fit nominal 8-inch (203 mm) I.D. pressure vessel.
- 1 inch = 25.4 mm

## Operating Limits

• Membrane Type	Polyamide Thin-Film Composite
• Maximum Operating Temperature <sup>a</sup>	113°F (45°C)
• Maximum Element Pressure Drop	15 psig (1.0 bar)
• pH Range, Continuous Operation <sup>a</sup>	2 - 11
• pH Range, Short-Term Cleaning (30 min.) <sup>b</sup>	1 - 13
• Maximum Feed Silt Density Index (SDI)	SDI 5
• Free Chlorine Tolerance <sup>c</sup>	<0.1 ppm

<sup>a</sup> Maximum temperature for continuous operation above pH 10 is 95°F (35°C).

<sup>b</sup> Refer to Cleaning Guidelines in Form No. 609-23010.

<sup>c</sup> Under certain conditions, the presence of free chlorine and other oxidizing agents will cause premature membrane failure. Since oxidation damage is not covered under warranty, FilmTec Corporation recommends removing residual free chlorine by pretreatment prior to membrane exposure. Please refer to technical bulletin 609-22010 for more information.

## Important Information

Proper start-up of reverse osmosis water treatment systems is essential to prepare the membranes for operating service and to prevent membrane damage due to overfeeding or hydraulic shock. Following the proper start-up sequence also helps ensure that system operating parameters conform to design specifications so that system water quality and productivity goals can be achieved.

Before initiating system start-up procedures, membrane pretreatment, loading of the membrane elements, instrument calibration and other system checks should be completed.

Please refer to the application information literature entitled "Start-Up Sequence" (Form No. 609-02077) for more information.

## Operation Guidelines

Avoid any abrupt pressure or cross-flow variations on the spiral elements during start-up, shutdown, cleaning or other sequences to prevent possible membrane damage. During start-up, a gradual change from a standstill to operating state is recommended as follows:

- Feed pressure should be increased gradually over a 30-60 second time frame.
- Cross-flow velocity at set operating point should be achieved gradually over 15-20 seconds.
- Permeate obtained from first hour of operation should be discarded.

## General Information

- Keep elements moist at all times after initial wetting.
- If operating limits and guidelines given in this bulletin are not strictly followed, the limited warranty will be null and void. Refer to DOW™ FILMTEC™ Reverse Osmosis and Nanofiltration Element Three-Year Prorated Limited Warranty (Form No. 609-35010).
- To prevent biological growth during prolonged system shutdowns, it is recommended that membrane elements be immersed in a preservative solution.
- The customer is fully responsible for the effects of incompatible chemicals and lubricants on elements.
- Maximum pressure drop across an entire pressure vessel (housing) is 50 psi (3.4 bar).
- Avoid static permeate-side backpressure at all times.

### DOW™ FILMTEC™ Membranes

For more information about DOW FILMTEC membranes, call the Dow Water & Process Solutions business:

North America: 1-800-447-4389

Latin America: (+33) 11-5188-5222

Europe: (+32) 3-450-2240

Pacific: +61 3 7959 2260

Japan: +813 5480 2100

China: +86 21 2301 1000

<http://www.dowwatersolutions.com>

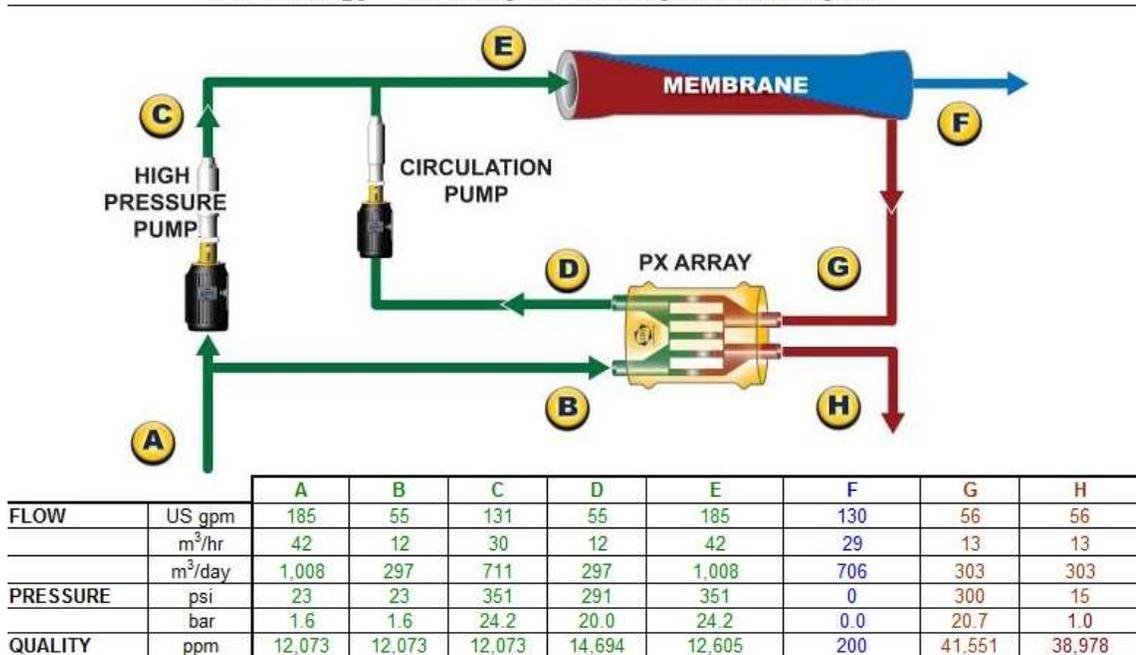
**Notice:** The use of this product in and of itself does not necessarily guarantee the removal of cysts and pathogens from water. Effective cyst and pathogen reduction is dependent on the complete system design and on the operation and maintenance of the system.

**Notice:** No freedom from any patent owned by Dow or others is to be inferred. Because use conditions and applicable laws may differ from one location to another and may change with time, Customer is responsible for determining whether products and the information in this document are appropriate for Customer's use and for ensuring that Customer's workplace and disposal practices are in compliance with applicable laws and other government enactments. Dow assumes no obligation or liability for the information in this document. NO WARRANTIES ARE GIVEN; ALL IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE ARE EXPRESSLY EXCLUDED.



## A.4. Memoria de Cálculo de recuperador de energía PX-70s

### PX<sup>®</sup> Energy Recovery Device System Analysis



#### PX UNIT

PX model		PX-70S	Brackish
Number of PX units	quantity	1	
PX unit flow	gpm	55.5	
PX lubrication per array	gpm	1.0	
PX lubrication flow	%	1.8%	
Differential pressure HP sid	psi	9.7	
Differential pressure LP sid	psi	7.8	
PX efficiency	%	93.1%	
PX mixing at membrane fee	%	4.4%	
Operating capacity	%	79.3%	
PX Power Savings	hp	14.1	
Estimated CO <sub>2</sub> Savings	tons/year	73	

#### HIGH PRESSURE PUMP

Pump efficiency	%	62%
Motor efficiency	%	93%
Power consumed	hp	43.4

#### CIRCULATION / BOOSTER PUMP

ERI PX booster pump model	60 Hz	HP-8503
Number of PX booster pump	quantity	1
Pump efficiency	%	55%
Motor efficiency	%	93%
VFD efficiency	%	95%
Power consumed	hp	4.0

#### SYSTEM FEED PUMP

	hp	0.0
--	----	-----

#### Notes:

ERI PX device and circulation pump selection is based upon assumptions not stated here. Please refer ERI sales personnel for additional information.

#### INPUT DESCRIPTIONS

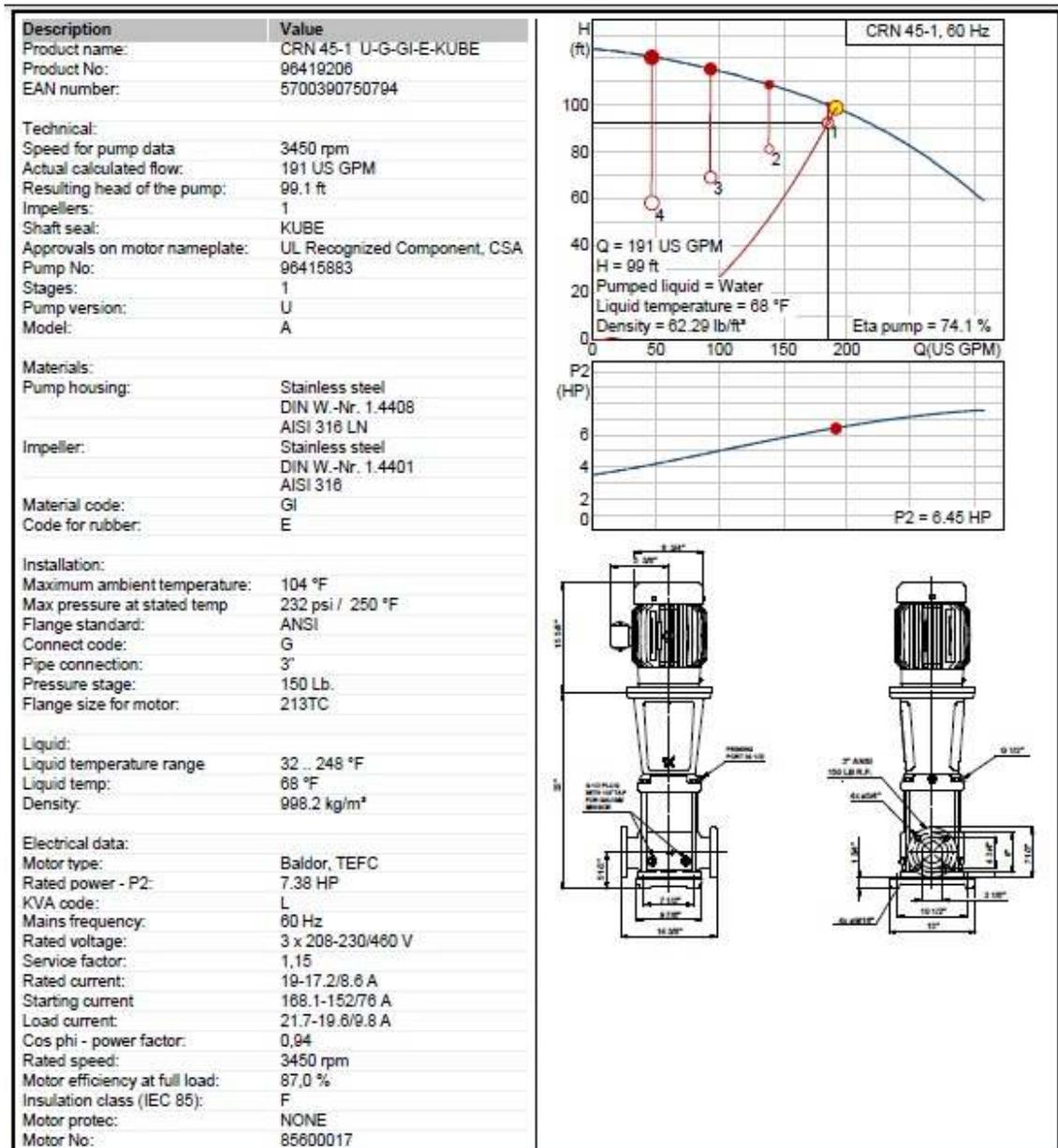
		INPUTS
Units Metric or English	M or E	E
Manual or auto efficiencies	m or a	m
Permeate flow	gpm	130
RO recovery rate	%	70%
RO feed pressure	psi	351.4
Membrane differential pressure	psi	51.0
PX LP discharge pressure	psi	15.0
Feedwater salinity	ppm	12,073
Motor power Hz	50 or 60	60
Currency	type	\$
Cost of power	\$/kWh	0.10
HP pump efficiency	%	62%
HP pump motor efficiency	%	93%
Circulation pump efficiency	%	55%
Circulation pump motor efficiency	%	93%
Circulation pump VFD efficiency	%	95%
PX device design margin	%	5%

#### PX SYSTEM POWER RESULTS

Total power consumption	kW	35
Specific power consumption	kWh/m <sup>3</sup>	1.20
Specific power consumption	kWh/kgal	4.5
Power cost saved with PX	\$/year	9,243

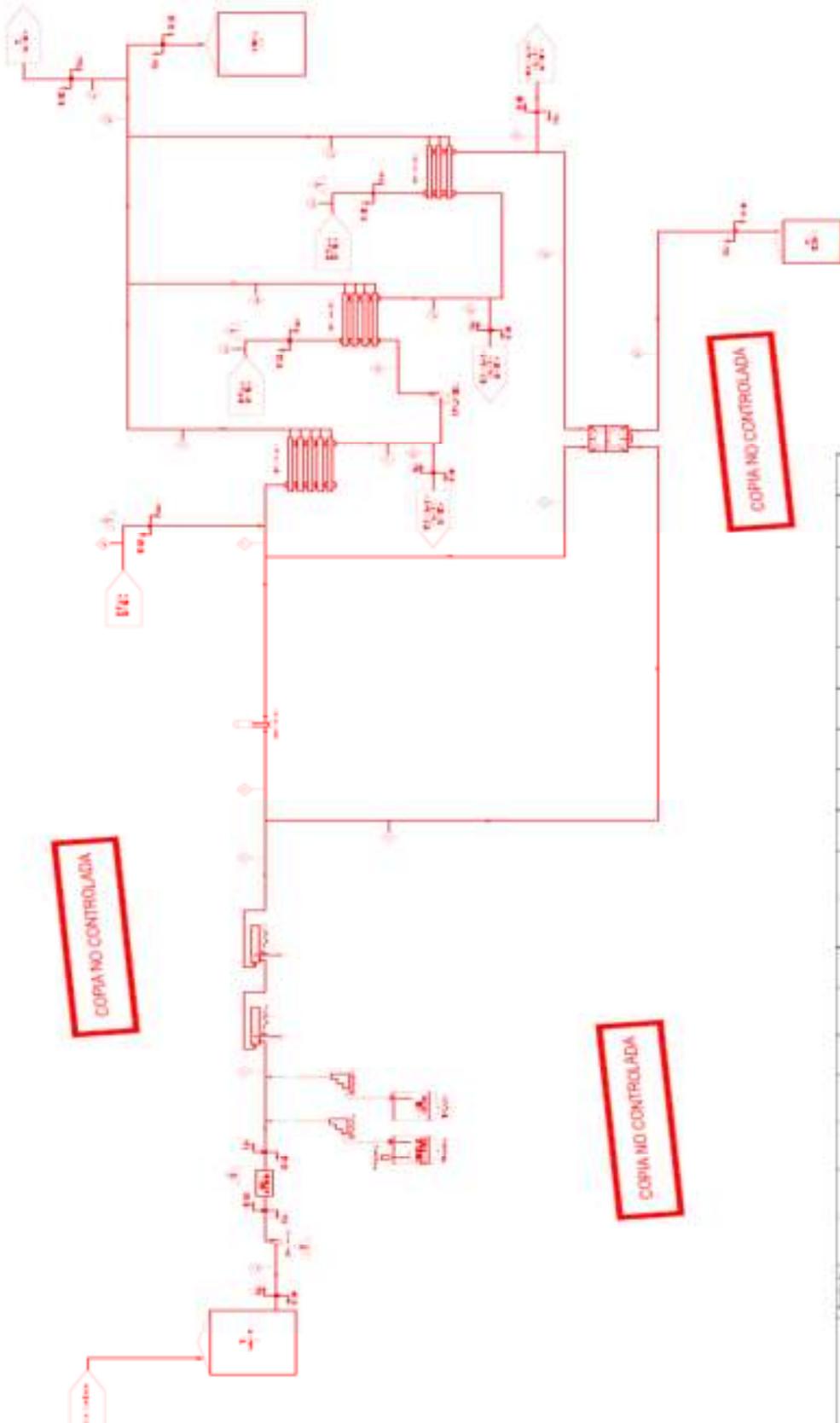
Warnings	NONE		
Suggestions	NONE		

## A.5. Curva de operación de bomba de baja presión





A.7. Diagrama de Flujo de Proceso en software AutoCAD



## **A.8. Manual del usuario del software ROSA.**

Al entrar al software se despliega una pantalla para crear un archivo nuevo, abrir uno ya existente o salir del software, al seleccionar la opción de crear un sistema, se desplegará la pantalla de “Feed Analysis” donde el usuario aplicará la opción “Specific Ions” e introducirá todos los valores de sales, sólidos disueltos y sólidos suspendidos contenidos en el agua en las casillas correspondientes, en caso de que el usuario no tenga el detalle del análisis, puede introducir un valor de sólidos disueltos totales en la casilla TDS.

Una vez que todos los datos han sido introducidos en el análisis, se procede a seleccionar la herramienta “System Configuration” en la cual el usuario realizará iteraciones a partir de la selección de la membrana que desee utilizar para su proceso, la cantidad de las mismas, el número de recipientes, la capacidad de los mismos y el arreglo en el que quedarán conformados.

El usuario puede tomar como referencia la capacidad de cada una de las membranas especificadas en los anexos para iniciar con la configuración del sistema, por ejemplo una membrana de modelo BW30-4040 produce en promedio 5 galones por minuto con una calidad de alimentación relativamente buena.

Al desplegarse la pantalla de configuración del sistema el usuario encontrará una serie de requerimientos para proceder con el diseño, estos requerimientos son:

- Flujo de agua producto en GPM requerido por el usuario.
- Porcentaje de recuperación del sistema a partir del agua cruda.

El programa tomará los valores de flujo de agua producto y el valor de recuperación para que automáticamente despliegue el flujo de alimentación al módulo, este valor será el dato principal para obtener posteriormente el tipo de pretratamiento necesario para el agua.

Posteriormente se requerirá por parte del usuario el valor de presión a la entrada y en la opción “Array” el usuario introducirá el número de arreglos necesarios para el módulo, es decir, el número de membranas que recuperarán agua en el primer paso y el número de membranas que recuperarán agua de rechazo del primer paso en un segundo o tercer paso, según lo sugiera el usuario; para el alcance del proyecto se recomienda solo hasta tres pasos en el sistema. Al seleccionar el número de pasos, el usuario observará que se presenta una carpeta por cada paso.

Es recomendable que para producir los flujos estimados en el alcance, se utilice la contrapresión (backpressure), esta contrapresión sirve para alcanzar el flujo producido castigando un poco a la membrana para obtener un incremento en el flujo y se localiza en las válvulas ubicadas en los cabezales de agua producto.

Después se localiza la herramienta “Scaling Calculations”, donde se determina el tipo de dosificación que sufrirá el agua para suavizarla un poco; la dosificación se determina en la parte superior seleccionando con un click en la ventanilla de ácido sulfúrico o ácido clorhídrico y tecleando el valor de la recuperación determinado en la etapa de configuración.

En la casilla para seleccionar el índice de Langelier se recomienda utilizar valores entre 1.1 y 1.3 y en el tipo de agua de alimentación es necesario indicar que es agua acidulada “acidified water”; una vez realizado esto, se procede a correr el programa y observar posibles advertencias.

Al observar los resultados arrojados por el software, es necesario recurrir a la parte inferior del análisis y observar si no existe alguna advertencia, en caso de que existan advertencias como:

- “MAXIMUM RECOVERY...” quiere decir que el valor de la recuperación que se seleccionó en la configuración es muy alto, por lo que se deberá disminuir y realizar las iteraciones necesarias hasta que desaparezca la advertencia.

- “MINIMUM FLOW...” significa que son muchas membranas, y es necesario revisar el número de elementos y recipientes en la etapa de configuración y realizar de nuevo las iteraciones necesarias hasta que desaparezca la advertencia.
- “PERMEATE EXCEEDS...” significa que son pocos los elementos para la cantidad de agua alimentada por lo que requerirá de incrementar el número de membranas y realizar las iteraciones necesarias hasta que la advertencia desaparezca.

De no existir ningún tipo de advertencia el momento de correr el programa, el usuario puede continuar iterando para encontrar el arreglo óptimo de la siguiente manera:

- Aumentar el valor de la recuperación por la membrana en la etapa de configuración e iterar continuamente, buscando así obtener más flujo de agua producto de la misma cantidad de agua de alimentación.
- Con la misma membrana en cada paso e iterando con la misma cantidad de flujo de agua producto, alterando el valor de la recuperación y el flujo de alimentación.

Si la proyección del programa ha sido satisfactoria para el programa y no ha aparecido ninguna advertencia, se realizará la impresión de los resultados en los que observaremos los valores de flujo, conductividad, presión osmótica, presión de alimentación recomendados; además las cantidades de membranas, recipientes y pasos para el diseño del módulo.